

SÉRIE A, N° 748.

N° D'ORDRE :

1521.

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

**M. Édouard SALLES,**

Préparateur à la Faculté des Sciences P. C. N.

1<sup>re</sup> THÈSE. — RECHERCHES SUR LES GAZ IONISÉS.

2<sup>e</sup> THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 20 juin 1913, devant la Commission d'Examen.

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| MM. E. BOUTY, | <i>Président.</i>    |
| G. URBAIN,    | { <i>Examineurs.</i> |
| P. LANGEVIN,  |                      |

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,  
Quai des Grands-Augustins, 55.

1913



SÉRIE A, N° 748.

N° D'ORDRE :  
1521.

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

**M. Édouard SALLES,**

Préparateur à la Faculté des Sciences P. C. N.

1<sup>re</sup> THÈSE. — RECHERCHES SUR LES GAZ IONISÉS.

2<sup>e</sup> THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 20 juin 1913, devant la Commission d'Examen.



MM. E. BOUTY, *Président.*  
G. URBAIN, *Examineurs.*  
P. LANGEVIN, }

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,  
Quai des Grands-Augustins, 55.

1913

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS.

|                         |                               |                                                   |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
|                         | MM.                           |                                                   |
| Doyen.....              | P. APPELL, Professeur.        | Mécanique analytique et mécanique céleste.        |
| Doyen honoraire.....    | G. DARBOUX.....               | Géométrie supérieure.                             |
| Professeurs honoraires. | CH. WOLF.                     |                                                   |
|                         | J. RIBAN.                     |                                                   |
|                         | LIPPMANN.....                 | Physique.                                         |
|                         | BOUTY.....                    | Physique.                                         |
|                         | BOUSSINESQ.....               | Physique mathématique et Calcul des probabilités. |
|                         | PICARD.....                   | Analyse supérieure et Algèbre sup.                |
|                         | Y. DELAGE.....                | Zoologie, Anatomie, Physiol. compar.              |
|                         | GASTON BONNIER.....           | Botanique.                                        |
|                         | DASTRE.....                   | Physiologie.                                      |
|                         | KÖNIGS.....                   | Mécanique phys. et expérimentale.                 |
|                         | VÉLAIN.....                   | Géographie physique.                              |
|                         | GOURSAT.....                  | Calcul différentiel et Calcul intégral.           |
|                         | HALLER.....                   | Chimie organique.                                 |
|                         | JOANNIS.....                  | Chimie (Enseignement P. C. N.).                   |
|                         | JANET.....                    | Physique (Enseignement P. C. N.).                 |
|                         | WALLERANT.....                | Minéralogie.                                      |
|                         | ANDOYER.....                  | Astronomie.                                       |
| Professeurs.....        | PAINLEVÉ.....                 | Mécanique rationnelle.                            |
|                         | HAUG.....                     | Géologie.                                         |
|                         | HOUSSAY.....                  | Zoologie.                                         |
|                         | H. LE CHATELIER.....          | Chimie.                                           |
|                         | GABRIEL BERTRAND.....         | Chimie biologique.                                |
|                         | M <sup>me</sup> P. CURIE..... | Physique générale.                                |
|                         | CAULLERY.....                 | Zool. (Évolution des êtres organisés).            |
|                         | C. CHABRIÉ.....               | Chimie appliquée.                                 |
|                         | G. URBAIN.....                | Chimie.                                           |
|                         | ÉMILE BOREL.....              | Théorie des fonctions.                            |
|                         | MARCHIS.....                  | Aviation.                                         |
|                         | JEAN PERRIN.....              | Chimie physique.                                  |
|                         | G. PRUVOT.....                | Zoologie, Anatomie, Physiol. comp.                |
|                         | MATRUCHOT.....                | Botanique.                                        |
|                         | ABRAHAM.....                  | Physique.                                         |
|                         | CARTAN.....                   | Calcul différentiel et Calcul intégral.           |
|                         | CL. GUICHARD.....             | Mathématiques générales.                          |
|                         | N.....                        | Applicat. de l'Analyse à la Géométrie.            |
|                         | N.....                        | Histologie.                                       |
|                         | PUISEUX.....                  | Mécanique et Astronomie.                          |
|                         | LEDUC.....                    | Physique.                                         |
|                         | MICHEL.....                   | Minéralogie.                                      |
|                         | HEROUARD.....                 | Zoologie.                                         |
|                         | LÉON BERTRAND.....            | Géologie.                                         |
| Professeurs adjoints... | RÉMY PERRIER.....             | Zoologie (Enseignement P. C. N.).                 |
|                         | MOLLIARD.....                 | Physiologie végétale.                             |
|                         | COTTON.....                   | Physique.                                         |
|                         | LESPIEAU.....                 | Chimie.                                           |
|                         | GENTIL.....                   | Pétrographie.                                     |
|                         | SAGNAC.....                   | Physique (Enseignement P. C. N.).                 |
|                         | PEREZ.....                    | Zool. (Évolution des êtres organisés).            |
| Secrétaire.....         | D. TOMBECK.                   |                                                   |

A

MONSIEUR P. LANGEVIN,

PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE.

Témoignage de reconnaissance.



---

# PREMIÈRE THÈSE.

---

## RECHERCHES SUR LES GAZ IONISÉS.

---

### GÉNÉRALITÉS.

1. L'ionisation d'un gaz est un phénomène essentiellement instable et passager, la conductibilité ne persistant qu'un temps très court, après que l'agent ionisant a cessé d'agir. Les ions positifs et négatifs participent au mouvement d'agitation thermique du gaz et soumis à leurs attractions mutuelles entrent fréquemment en collision; deux ions peuvent donc se recombiner pour former un système électriquement neutre. En réalité chaque collision n'est pas fatalement suivie d'une recombinaison : d'après les calculs de M. Langevin <sup>(1)</sup>, dans l'air normal il n'y aurait qu'une recombinaison pour quatre collisions.

*Coefficient de recombinaison.* — Considérons, en l'absence de tout champ électrique extérieur, un gaz ionisé; le nombre de recombinaisons qui ont lieu en une seconde par unité de volume, est proportionnel au produit  $pn$  des nombres d'ions positifs et négatifs, présents à l'instant considéré, multiplié par un facteur constant  $\alpha$ ; ce facteur s'appelle le *coefficient de recombinaison*.  $p$  et  $n$  peuvent être considérés comme égaux en général.

Soit  $q$  le nombre d'ions produit par l'agent ionisant

---

<sup>(1)</sup> *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1903, 8<sup>e</sup> série, t. I, p 437.

par unité de volume, nous avons

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2.$$

Quand la production équilibre la recombinaison, un régime permanent s'établit, la relation précédente devient

$$q = \alpha n^2.$$

*Mobilité.* — En présence d'un champ électrique (le gaz étant contenu par exemple entre les armatures d'un condensateur), les ions positifs descendent le champ, tandis que les ions négatifs le remontent, et cela avec une vitesse proportionnelle au champ.

On appelle mobilité  $k$  d'un ion, la vitesse dont est animé cet ion dans un champ de 1 volt par centimètre; en un point où l'intensité du champ est  $X$ , la vitesse est égale au produit  $kX$ .

2. *Coefficient de diffusion.* — Supposons un gaz ionisé renfermé dans une enceinte métallique, les ions qui arrivent au voisinage de la paroi y induisent des charges de signe contraire à la leur; ils sont donc attirés par elle, et perdent leur charge au moment du contact; il y a une sorte d'absorption des ions par le métal et leur concentration est nulle à la paroi. Il en résulte un gradient de concentration dirigé vers l'intérieur de la masse gazeuse et par suite un phénomène de diffusion. Ce qui se passe est analogue à ce qui aurait lieu si l'on renfermait un gaz chargé de vapeur d'eau dans une enceinte dont les parois seraient recouvertes d'acide sulfurique.

Soit un gaz ionisé entre deux lames métalliques perpendiculaires à un axe  $Ox$ , appelons  $n$  la densité des charges libres de chaque signe; en l'absence de champ extérieur, chaque unité de surface d'un plan parallèle

aux armatures est traversée pendant l'unité de temps par une quantité d'électricité

$$-D \frac{\partial n}{\partial x}.$$

$D$  est ce qu'on appelle le *coefficient de diffusion* des ions considérés. L'accroissement qui en résulte dans une tranche d'épaisseur  $dx$  est

$$-D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}.$$

Et quand le régime permanent est établi, on a

$$q + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \alpha n^2.$$

Dans le cas où les armatures sont très rapprochées, la recombinaison peut être négligeable devant la diffusion; si elles sont très écartées, c'est l'inverse qui peut se produire.

3. Rutherford <sup>(1)</sup> est le premier qui ait mis en évidence la diffusion des ions, mais les mesures précises du coefficient de diffusion ont été exécutées par Townsend. Rutherford attira l'attention sur ce fait que l'ion négatif devait diffuser plus vite que l'ion positif.

Un phénomène semblait venir compliquer les choses; la vitesse de diffusion paraissait dépendre de la nature des parois: en faisant circuler le gaz ionisé dans des tubes de zinc et d'étain, Rutherford avait trouvé une différence d'environ 20 pour 100 entre les vitesses de diffusion des centres positifs et négatifs; dans le cas du cuivre cette différence était beaucoup moindre. Aussi J.-J. Thomson <sup>(2)</sup> pensa-t-il qu'en plus de la diffu-

---

<sup>(1)</sup> *Phil. Mag.*, 1897.

<sup>(2)</sup> *Conduction of Electricity through gages*, 1903, p. 28.

sion, il y avait un effet spécifique dû à la nature du métal.

Quand Zeleny eut montré la dissymétrie des deux ions par ses mesures du rapport des mobilités, il devint manifeste que l'ion négatif devait diffuser plus vite que le positif. On comprenait également bien une expérience du même auteur <sup>(1)</sup> où, faisant circuler un gaz ionisé entre des parois métalliques très rapprochées, il trouva que le gaz portait à la sortie une charge positive. Avec l'acide carbonique ce phénomène n'avait pas lieu, les mobilités des deux ions étant sensiblement les mêmes.

4. L'étude de la diffusion des ions permettra d'avoir des renseignements précieux sur leur constitution; on sait de plus que, d'après la théorie cinétique, le coefficient de diffusion d'un gaz dans un autre est en raison inverse de la pression; il est intéressant de rechercher si cette loi se vérifie pour les ions.

Mais ce qui est plus important, c'est que connaissant la mobilité et le coefficient de diffusion, on pourra comparer la charge qu'ils portent à celle de l'atome d'hydrogène mis en liberté dans l'électrolyse (Townsend).

5. Considérons un élément de volume  $s$  placé dans une région où la concentration des ions est  $n$ , normalement à la direction suivant laquelle la concentration va en diminuant. Le nombre d'ions traversant cet élément par unité de volume est

$$-sD \frac{\partial n}{\partial x},$$

et leur vitesse

$$-s \frac{D}{n} \frac{\partial n}{\partial x}.$$

La diffusion résulte de la variation de la pression partielle  $p$  des ions quand on se déplace suivant l'axe

---

<sup>(1)</sup> *Phil. Mag.*, 1898.

des  $x$ ; la différence des pressions sur les deux faces de l'élément  $s dx$  sera

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx,$$

et la pression sur chaque ion

$$-\frac{1}{n} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

Supposons maintenant qu'il existe un champ électrique de valeur  $h$ , la force  $eh$  due à ce champ sur l'ion dont la charge est  $e$  communique à cet ion une vitesse  $kh$ ; si nous supposons que les forces sont proportionnelles aux vitesses

$$D \frac{\partial n}{\partial x} = \frac{kh}{\frac{\partial p}{\partial x}}.$$

Les ions étant à l'état gazeux  $\frac{n}{p} = \frac{N}{P}$ ,  $N$  représentant le nombre des molécules par unité de volume, et  $P$  la pression du gaz

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{N}{P} \frac{\partial p}{\partial x},$$

d'où

$$\frac{k}{D} = \frac{Ne}{P}.$$

Appelons  $\varepsilon$  la charge portée par l'atome d'hydrogène dans l'électrolyse

$$\frac{k}{D} = \frac{N\varepsilon}{P} \frac{e}{\varepsilon}.$$

A 18° C.

$$\frac{N\varepsilon}{P} = 1,2 \cdot 10^4,$$

d'où

$$\frac{k}{D} = 1,2 \cdot 10^4 \frac{e}{\varepsilon}.$$

Les recherches exposées dans ce travail ne sont qu'une

partie d'un programme plus étendu que les circonstances ne m'ont pas permis d'exécuter en entier; elles sont divisées en deux parties : dans la première, j'ai mesuré le coefficient de diffusion des ions à l'aide d'une méthode imaginée et réalisée avant moi par M. Townsend; dans la seconde, j'ai étudié un mode expérimental nouveau imaginé par M. Langevin, destiné à déterminer directement  $\frac{k}{D}$ .

Les expériences sur la diffusion ont été exécutées au Collège de France dans le laboratoire de M. Langevin, celles dans lesquelles j'ai mesuré  $\frac{k}{D}$  au laboratoire d'enseignement de Physique du P.C.N. Je tiens à remercier mon maître M. Langevin de l'intérêt qu'il n'a cessé de me témoigner et des précieux conseils qu'il m'a prodigués sans relâche au cours de mes recherches.

---

## PREMIÈRE PARTIE.

## CHAPITRE I.

## Recherches diverses sur la diffusion des ions.

## MESURE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION DES IONS PAR TOWNSEND.

6. La méthode de Townsend <sup>(1)</sup> consiste à faire passer le gaz ionisé dans des tubes métalliques étroits, et à déduire le coefficient de diffusion du rapport des concentrations en ions à l'entrée et à la sortie des tubes, ou, ce qui revient au même, du rapport des courants de saturation.

Considérons un élément de volume  $dx dy dz$ , contenant  $n$  ions par unité de volume, et soient  $u, v, w$  les composantes des vitesses prises par les charges au point  $x y z$ , l'équation de continuité donne

$$(1) \quad \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nu)}{\partial x} + \frac{\partial(nv)}{\partial y} + \frac{\partial(nw)}{\partial z} = 0.$$

Lorsque le régime permanent est établi,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0.$$

Puisque le champ est nul à l'intérieur d'un tube métallique, et qu'il existe un mouvement d'entraînement des ions, de vitesse  $W$ , suivant l'axe des  $z$ , les équation du

---

(<sup>1</sup>) La méthode de Townsend ayant été publiée en entier, dans *Ions, Électrons, Corpuscules*, je n'en donne qu'un résumé, et je n'indique que la marche du calcul.

mouvement des ions sont

$$(2) \quad \left\{ \begin{array}{l} u = -\frac{D}{p} \frac{\partial n}{\partial x}, \\ v = -\frac{D}{p} \frac{\partial n}{\partial y}, \\ w = -\frac{D}{p} \frac{\partial n}{\partial z} + W. \end{array} \right.$$

Dans les expériences,  $\frac{\partial n}{\partial z}$  est négligeable devant  $\frac{1}{D} p W$ , d'où

$$(3) \quad \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} - \frac{1}{D} W \frac{\partial n}{\partial z} = 0.$$

La vitesse d'entraînement du gaz est fonction de la distance à l'axe du tube, maximum à l'axe, nulle à la paroi; en appelant  $V$  la vitesse moyenne à une distance  $r$  de l'axe,  $a$  étant le diamètre du tube,

$$W = \frac{2V}{a^2} (a^2 - r^2).$$

Remplaçant dans (3) et passant aux coordonnées polaires

$$(4) \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial n}{\partial r} \right) - \frac{2V}{Da^2} (a^2 - r^2) \frac{\partial n}{\partial r} = 0.$$

La densité des charges doit être nulle à la paroi quel que soit  $z$ ; en conséquence :

$$\begin{array}{lll} \text{pour } r = a, & \text{quel que soit } z, & n = 0; \\ \text{pour } z = 0, & \text{quel que soit } r, & n = n_0; \end{array}$$

$n_0$  étant la densité des ions à l'entrée des tubes.

Posons

$$n = \Phi(r) e^{-\frac{2\theta r^2}{a^2 V}},$$

$\theta$  étant une constante, l'équation (4) devient

$$\frac{d}{d\rho} \left( \rho \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right) + \theta (1 - \rho) \Phi = 0,$$

avec

$$\rho = \frac{r^2}{\alpha^2}.$$

Cette équation est linéaire du deuxième ordre en  $\Phi$ ; si M et N en sont deux solutions particulières, la solution générale sera

$$\Phi = \alpha M + \beta N,$$

$\alpha$  et  $\beta$  étant des constantes arbitraires.

Après intégration, il vient pour le rapport des concentrations en ions à l'entrée et à la sortie d'un tube de longueur  $l_1$ ,  $u$  étant le débit gazeux,

$$R = 4 \left( 0,195 e^{-\frac{7,31 \pi D l_1}{2u}} + 0,0243 e^{-\frac{44,56 \pi D l_1}{2u}} + \dots \right).$$

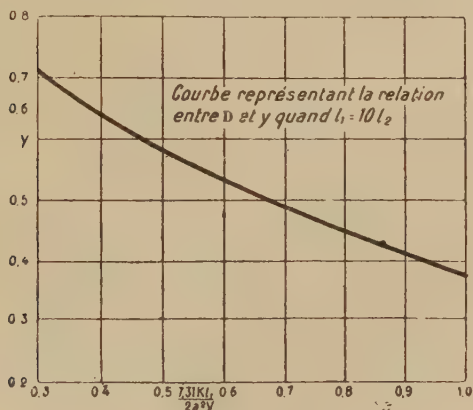


Fig. 1.

Afin d'éliminer l'influence des remous dus aux extrémités des tubes, Townsend comparait les charges présentes dans le gaz à la sortie de tubes de longueur  $l_1$  et  $l_2$ , on a donc

$$R = \frac{0,195 e^{-\frac{7,31 \pi D l_1}{2u}} + 0,0243 e^{-\frac{44,56 \pi D l_1}{2u}}}{0,195 e^{-\frac{7,31 \pi D l_2}{2u}} + 0,0243 e^{-\frac{44,56 \pi D l_2}{2u}}}.$$

Posant

$$R = \gamma \quad \text{et} \quad 7,31 \frac{\pi D l_1}{2 u} = x,$$

on trace la courbe en calculant les valeurs de  $\gamma$  correspondant à des valeurs données de  $x$  (*fig. 1*); l'expérience donne  $\gamma$ , rapport des courants de saturation, on en déduit la valeur correspondante de  $x$ , et par suite  $D$ .

La précision des mesures est liée au mode de calcul; l'erreur sur  $D$  sera plus grande que l'erreur sur  $\gamma$ . Par exemple, au point où  $\gamma = 0,5$ , une erreur de 4 pour 100 sur  $\gamma$  donnera naissance à une erreur de 6 pour 100 sur  $D$ .

7. L'appareil de Townsend (*fig. 2*) comprend deux tubes de cuivre de 3<sup>cm</sup> de diamètre  $A_1$  et  $A_2$  munis en  $W_1$  et  $W_2$

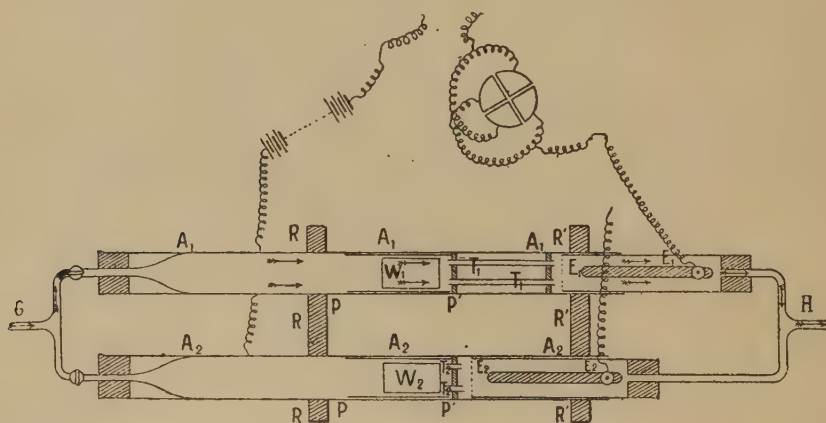


Fig. 2.

de fenêtres d'aluminium;  $A_1$  contient un ensemble de tubes de laiton  $T_1$  de 3<sup>mm</sup> de diamètre, et de 10<sup>cm</sup> de long,  $A_2$  un autre  $T_2$  formé de tubes de même diamètre, mais n'ayant que 1<sup>cm</sup> de longueur. C'est à travers ces tubes que les ions diffuseront. Les tubes étroits sont soudés dans des trous percés dans des disques de laiton

s'adaptant exactement à l'intérieur de  $A_1$  et  $A_2$ ; les trous, au nombre de 12, sont équidistants et situés sur un même cercle concentrique aux tubes  $A_1$  et  $A_2$ ; la vitesse prise par le gaz dans chaque tube étroit est par suite la même. Les électrodes  $E_1$ ,  $E_2$  sont placées à des distances égales des faces de sortie de  $T_1$  et  $T_2$ . Le gaz est amené par le tube  $G$ , et sort par  $H$ ;  $G$  et  $H$  sont reliés à deux gazomètres, de sorte que le gaz passe de l'un à l'autre, soit en traversant  $A_1$ , soit en traversant  $A_2$ . L'appareil est solidement fixé par deux blocs d'ébonite  $R$  et  $R'$  sur la boîte de bois doublée de plomb renfermant la bobine et le tube producteur de rayons  $X$ . Par un glissement latéral on amène  $W_1$  ou  $W_2$ , au-dessus d'une ouverture percée dans la boîte; le tube de Crookes est placé immédiatement au-dessous de cette ouverture.

L'appareil étant relié au pôle positif d'une batterie de petits accumulateurs dont l'autre pôle est au sol, Townsend fait circuler le gaz dans  $A_1$ , jusqu'à ce que la vitesse permanente du gaz soit atteinte; puis l'électrode étant reliée à l'électromètre, il fait fonctionner le tube de Crookes un temps déterminé, généralement 20 secondes. Les rayons  $X$  pénètrent par  $W_1$  et ionisent le gaz. Soit  $n_1$  le nombre de divisions parcouru par le spot sur l'échelle. L'appareil est alors relié au pôle négatif de la batterie, et la mesure exécutée de la même façon; soit  $n_2$  la nouvelle déviation. Townsend fait alors circuler le gaz dans  $A_2$ , et répète la même expérience; soient  $n'_1$  et  $n'_2$  les déviations observées sur l'échelle.

La vitesse de chute de la cloche du gazomètre permet de calculer la vitesse du courant gazeux (<sup>1</sup>).

8. Les déviations de l'électromètre sont proportionnelles au nombre d'ions recueillis par l'électrode; appelons  $\frac{1}{c}$

(<sup>1</sup>) Le gaz doit se déplacer en filets parallèles; j'indiquerai plus loin les conditions du régime.

le facteur de proportionnalité. Dans le parcours des ions à l'intérieur des tubes  $T_1$ ,  $cn_2$  ions franchissent la section d'abscisse  $1^{cm}$ , et  $cn_1$  la section terminale d'abscisse  $10^{cm}$ .

La plupart des  $c(n_2 - n_1)$  autres ions ont diffusé sur la paroi le long des neuf derniers centimètres, les autres ont disparu par recombinaison. Soit  $cM$  le nombre d'ions qui se sont recombinés, le rapport  $y$  ne peut être pris égal à  $\frac{n_1}{n_2}$  mais à  $\frac{n_1 + M}{n_2}$ .

Pour effectuer cette correction, Townsend ôte les tubes  $T_1$  et  $T_2$ , et replace les électrodes dans les positions qu'elles occupaient; il répète alors les expériences exactement comme précédemment. Soit  $N_1$  le nombre de divisions dont le spot a dévié sur l'échelle, quand le gaz a circulé dans  $A_1$ ,  $N_2$  quand il a circulé dans  $A_2$ ; Townsend a montré <sup>(1)</sup> que

$$M = \frac{N_2 - N_1}{N_1 N_2} \frac{\theta}{T'} \frac{n_1(n_2 - n_1)}{\text{Log} \frac{n_2}{n_1}}.$$

$T$  est le temps mis par le gaz pour aller de la section d'abscisse  $1^{cm}$  à celle de section  $10^{cm}$  dans  $A_1$  et  $A_2$ ,  $\theta$  celui pendant lequel il effectue le même trajet dans les tubes étroits,  $n_1$  et  $n_2$  sont les déviations lues dans les premières expériences.

### 9. Résultats numériques :

#### *Coefficients de diffusion des ions dans les gaz secs.*

| Gaz.                 | D ions +. | D ions —. | Valeurs moyennes de D. | Rapport des valeurs de D. |
|----------------------|-----------|-----------|------------------------|---------------------------|
| Air.....             | 0,028     | 0,043     | 0,0347                 | 1,54                      |
| Oxygène.....         | 0,025     | 0,0396    | 0,0323                 | 1,58                      |
| Anhydride carbonique | 0,023     | 0,026     | 0,0245                 | 1,13                      |
| Hydrogène.....       | 0,023     | 0,190     | 0,0256                 | 1,54                      |

<sup>(1)</sup> Ions, Électrons, Corpuscules, t. II.

*Coefficients de diffusion des ions dans les gaz humides.*

| Gaz.                 | D ions +. | D ions —. | Valeurs moyennes de D. | Rapport des valeurs de D. |
|----------------------|-----------|-----------|------------------------|---------------------------|
| Air.....             | 0,032     | 0,035     | 0,0345                 | 1,09                      |
| Oxygène.....         | 0,0288    | 0,0358    | 0,0323                 | 1,24                      |
| Anhydride carbonique | 0,0245    | 0,0255    | 0,025                  | 1,04                      |
| Hydrogène.....       | 0,128     | 0,142     | 0,134                  | 1,11                      |

On en déduit pour le produit  $Ne$  les valeurs suivantes :

|                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| Air.....                  | $N_e = 1,35.10^{10}$ |
| Oxygène.....              | $N_e = 1,25.10^{10}$ |
| Anhydride carbonique..... | $N_e = 1,30.10^{10}$ |
| Hydrogène.....            | $N_e = 1,00.10^{10}$ |

D'autre part, dans le cas de l'atome d'hydrogène dégagé dans l'électrolyse, on sait que  $N_e = 1,22.10^{10}$ .

Comme  $N$  est une constante universelle, la conclusion qui s'impose est la suivante : « Les charges portées par les ions produits par les rayons de Röntgen dans les gaz étudiés sont égales entre elles, et identiques à celle que porte l'atome d'hydrogène dans l'électrolyse. »

10. Examinons maintenant les valeurs d'un certain nombre de coefficients de diffusion de gaz et de vapeurs l'un dans l'autre <sup>(2)</sup>.

| Gaz.                                      | Coefficient de diffusion en $\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}$ . |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| CO — CO <sup>2</sup> .....                | 0,13142                                                        |
| O <sup>2</sup> — CO <sup>2</sup> .....    | 0,13569                                                        |
| Air — O <sup>2</sup> .....                | 0,17778                                                        |
| H <sup>2</sup> — Air.....                 | 0,63450                                                        |
| Éther — H <sup>2</sup> .....              | 0,296                                                          |
| Éther — Air.....                          | 0,0775                                                         |
| Éther — CO <sup>2</sup> .....             | 0,0552                                                         |
| Amide isobutylique — H <sup>2</sup> ..... | 0,01724                                                        |
| Amide isobutylique — Air.....             | 0,0426                                                         |
| Amide isobutylique — O <sup>2</sup> ..... | 0,0305                                                         |

(1) Les mobilités ont été calculées d'après la somme des deux mobilités déterminée par Rutherford (*Phil. Mag.*, juillet 1898).

(2) WINCHELMANN, *Handbuch der Physik*.

Il est facile de calculer le coefficient de diffusion d'un gaz dans lui-même :

|                   |      |                     |       |
|-------------------|------|---------------------|-------|
| $H^2 - H^2$ ..... | 1,2  | $CO^2 - CO^2$ ..... | 0,092 |
| $O^2 - O^2$ ..... | 1,17 | Air — Air.....      | 0,150 |

Ces valeurs sont beaucoup plus considérables que les coefficients de diffusion des ions dans les gaz correspondants.

11. Dans le cas où l'ionisation est produite par les corps radioactifs, Townsend a obtenu les résultats suivants, le gaz étant l'air :

| <i>Air sec.</i> |           | <i>Air humide.</i> |           |
|-----------------|-----------|--------------------|-----------|
| D ions +.       | D ions —. | D ions +.          | D ions —. |
| 0,0317          | 0,0429    | 0,364              | 0,0407    |

Voici les coefficients de diffusion, pour les ions négatifs produits par l'action des rayons ultraviolets frappant une lame de zinc chargée négativement :

| <i>Air sec.</i> |        | <i>Air humide.</i> |        |
|-----------------|--------|--------------------|--------|
| mm              |        | mm                 |        |
| 761             | 0,0427 | 762                | 0,0368 |
| 748             | 0,0438 | 772                | 0,0360 |
| 761             | 0,0440 |                    |        |

Townsend a étudié également, dans des circonstances variées, les ions produits par l'aigrette :

*Ions positifs.* — Dans l'air sec la valeur du coefficient de diffusion a oscillé entre 0,0263 et 0,0216, et dans l'air humide entre 0,0271 (pression 750<sup>mm</sup>) et 0,0291 (même pression).

*Ions négatifs.* — Dans l'air sec la valeur du coefficient de diffusion a oscillé entre 0,0382 et 0,0324, et dans l'air humide entre 0,0376 et 0,0395.

Dans ces expériences il y a, sans aucun doute, des gros ions entraînés.

12. Townsend a également fait des *expériences à pression réduite*, afin de voir si le produit de la pression par le coefficient de diffusion est un nombre constant, la source ionisante étant une substance radioactive.

Pression.                      D.                       $P \times D$ .                      Température.

*Ions positifs dans l'air sec.*

| mm  |        |      | °  |
|-----|--------|------|----|
| 772 | 0,0317 | 24,5 | 19 |
| 550 | 0,0420 | 23,1 | 18 |
| 400 | 0,0578 | 23,1 | 16 |
| 300 | 0,0780 | 23,4 | 13 |
| 200 | 0,118  | 23,6 | 12 |

*Ions négatifs dans l'air sec.*

|     |        |      |    |
|-----|--------|------|----|
| 772 | 0,0429 | 33   | 19 |
| 550 | 0,0542 | 29,8 | 13 |
| 400 | 0,0780 | 31,2 | 16 |
| 300 | 0,103  | 30,9 | 13 |
| 200 | 0,155  | 31,0 | 12 |

*Ions positifs dans l'air humide.*

|     |        |      |     |
|-----|--------|------|-----|
| 772 | 0,0364 | 28,0 | 18  |
| 400 | 0,0668 | 26,7 | 14  |
| 200 | 0,134  | 26,8 | 9,5 |

*Ions négatifs dans l'air humide.*

|     |        |      |     |
|-----|--------|------|-----|
| 772 | 0,0407 | 31,5 | 18  |
| 400 | 0,0771 | 30,8 | 14  |
| 200 | 0,147  | 29,4 | 9,5 |

RECHERCHES DE FRANCK ET WESTPHAL.

13. Mes premiers résultats avaient été publiés <sup>(1)</sup> quand parurent les travaux de Franck et Westphal <sup>(2)</sup>. Dans leur appareil, la substitution des tubes longs aux tubes courts se faisait à l'aide d'un barillet rotatif R (*fig. 3*). L'électrode qui recueillait les charges pouvait glisser parallèlement à elle-même dans un tube, de façon que

(<sup>1</sup>) *Radium*, 1908, p. 321.

(<sup>2</sup>) *Berichte Deutsch. Physik. Ges.*, 1909, p. 146.

son extrémité fût toujours à la même distance de la face de sortie des tubes de diffusion. Le gaz avant d'entrer dans l'appareil était ionisé dans la boîte  $C_1$ . Afin d'éviter

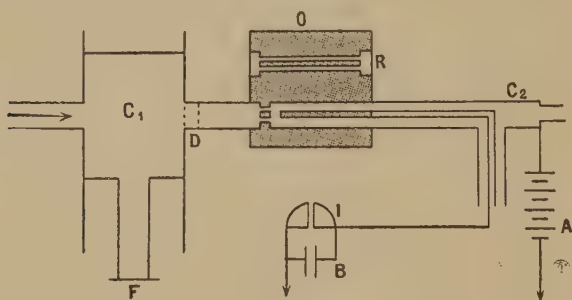


Fig. 3.

l'effet de recombinaison, un champ auxiliaire était établi en  $C_1$ , dans le but de capter les ions de signe opposé à ceux dont on observait la diffusion. En D pouvaient être disposées des toiles métalliques. Les charges recueillies par l'électrode étaient mesurées à l'aide d'une résistance Bronson B.

Le même appareil permettait d'exécuter sur le même gaz la mesure des mobilités par la méthode de Zeleny. Ces mobilités ne présentaient rien d'anormal.

Franck et Westphal cherchaient si, dans les gaz ionisés par les rayons de Röntgen, il y avait formation d'ions à charges multiples comme l'avait affirmé Townsend; ils déduisaient de leur mesure de  $k$  et de  $D$  la valeur du produit  $Ne$ . Ils trouvèrent pour  $D$  avec une précision de 6 pour 100 :

|                                           |        |
|-------------------------------------------|--------|
| Ions + sans champ auxiliaire en $C_1$ ... | 0,0298 |
| Ions + avec » ...                         | 0,0290 |
| Ions — sans » ...                         | 0,0452 |
| Ions — avec » ...                         | 0,0448 |

La valeur de  $Ne$  déduite de leurs recherches pour les

ions positifs est supérieure de 12 pour 100 à celle relative aux ions négatifs; il n'y aurait donc que quelques ions positifs porteurs de charges doubles. La mobilité ayant la valeur normale, on doit s'attendre à trouver pour le coefficient de diffusion une valeur plus faible que si tous les ions portaient une charge simple; la valeur de ce coefficient sera donc comprise entre  $D$  et  $\frac{D}{2}$ .

Franck et Westphal ont essayé de filtrer les ions les plus mobiles à travers des toiles métalliques placées en  $D$ ; c'est ce qu'ils ont appelé *la diffusion fractionnée*. Avec un courant de gaz très lent, ils ont trouvé que le coefficient de diffusion devenait d'autant plus faible que le nombre de toiles métalliques traversées par le gaz était plus grand.

| Nombre de toiles<br>métalliques. | $D$ .  |
|----------------------------------|--------|
| 1                                | 0,029  |
| 2                                | 0,020  |
| 3                                | 0,0175 |

Une formule d'interpolation leur a permis de se rendre compte qu'il devait y avoir 9 pour 100 d'ions à charge double. Avec un nombre plus considérable de toiles, les mesures n'étaient plus possibles; par conséquent la question d'ions à triples charges, etc., n'a pu être tranchée.

14. Les mêmes expériences ont été faites avec d'autres sources d'ionisation.

#### Rayons $\alpha$ (Polonium).

| Vitesse<br>$\frac{\text{cm.}}{\text{sec.}}$ | Coefficient<br>moyen. | Vitesse<br>$\frac{\text{cm.}}{\text{sec.}}$ | Coefficient<br>moyen. |
|---------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-----------------------|
| 74                                          | 0,037                 | 43                                          | 0,036                 |
| 61                                          | 0,037                 | 39                                          | 0,034                 |
| 56                                          | 0,034                 | 32                                          | 0,036                 |
| 47                                          | 0,035                 | »                                           | »                     |
| S.                                          |                       |                                             |                       |

Les ions traversaient des toiles métalliques, dont le nombre a varié.

*Rayons  $\beta$ .*

| Nombre<br>de toiles. | Coefficient<br>moyen. |
|----------------------|-----------------------|
| 0                    | 0,037                 |
| 2                    | 0,037                 |
| 5                    | 0,038                 |
| »                    | »                     |
| »                    | »                     |
| »                    | »                     |

*Rayons  $\gamma$ .*

| Nombre<br>de toiles. | Coefficient<br>moyen. |
|----------------------|-----------------------|
| 0                    | 0,037                 |
| 1                    | 0,036                 |
| 2                    | 0,036                 |
| 3                    | 0,034                 |
| 4                    | 0,035                 |
| 5                    | 0,036                 |

La précision était trop faible pour dire si dans le cas des rayons  $\gamma$  il existait des ions à charge double.

*Aigrette.*

| Ions +.              |                       | Ions —.  |                       |
|----------------------|-----------------------|----------|-----------------------|
| Nombre<br>de toiles. | Coefficient<br>moyen. | Vitesse. | Coefficient<br>moyen. |
| 0                    | 0,028                 | 106      | 0,054                 |
| 1                    | 0,027                 | 56       | 0,041                 |
| 2                    | 0,024                 | 25       | 0,029                 |
| 3                    | 0,021                 | 94       | 0,027                 |

## RECHERCHES DIVERSES.

15. J'ai rappelé au début que Zeleny, ayant fait circuler un gaz ionisé entre des parois métalliques extrêmement rapprochées, avait constaté que le gaz portait une charge positive. Villari <sup>(1)</sup> avait été surpris de voir que lorsque le gaz ionisé passait contre un métal avec un plus ou moins grand frottement, la charge pouvait être positive ou négative. Simpson <sup>(2)</sup> a montré que ces résultats s'interprétaient parfaitement, et n'étaient pas en désaccord avec les expériences de Zeleny. Pour cela il faisait circuler

(1) VILLARI, *Congrès de Physique de 1900* et *Phil. Mag.*, t. VIII, 1901, p. 535.

(2) GEORGE C. SIMPSON, *Phil. Mag.*, 1903, 2, p. 589.

le gaz dans deux tubes métalliques A et C de 5<sup>cm</sup> de longueur, séparés par un tube de verre de 20<sup>cm</sup>; on constate que A se charge négativement, C positivement. Dans A un excès d'ions négatif ayant diffusé, le gaz contient un excès d'ions positifs; pendant le trajet entre les deux tubes A et C il y a recombinaison, et dans ce dernier ce sont les ions positifs qui viennent diffuser. Villari n'avait pas tenu compte du temps qui s'écoulait entre le moment où le processus d'ionisation avait lieu, et l'arrivée du gaz sur le conducteur isolé.

16. On doit à Simpson l'expérience suivante. Il prit une boîte servant à projeter les tores de fumée de Kelvin, et dans laquelle il fit pénétrer des rayons de Röntgen; en détendant le fond élastique de la boîte, il projetait un tore d'air qui venait rencontrer une cage de toile métallique reliée à un électromètre. Aucune charge ne se manifestait si le tore mettait plus de  $\frac{1}{10}$  de seconde à parcourir la distance séparant la boîte de la toile métallique; pour un temps moindre on constatait une charge positive, indiquant que les ions négatifs avaient diffusé dans l'air. Dans le premier cas, les ions avaient disparu par recombinaison. Avec de la fumée de tabac on constate une charge négative, mais il y a des gros ions, et la fumée possède une charge propre.

17. Ebert <sup>(1)</sup> plaça un sel de radium à l'intérieur d'un vase poreux fermé par un couvercle métallique, et relié à un électromètre; le vase poreux était renfermé dans une enceinte métallique mise au sol et communiquant avec une machine pneumatique. Dès qu'on mettait cette dernière en marche, il se produisait un appel d'air à travers les parois du vase poreux, l'air ionisé par le

---

(<sup>1</sup>) *Phys. Zeits.*, t. IV, 1904, p. 134.

sel de radium diffusait, et le vase poreux prenait une charge négative. On verra plus loin comment Ebert a utilisé cette observation en météorologie.

18. Schmauss <sup>(2)</sup> eut l'idée de faire l'expérience suivante, dans laquelle ce n'est plus le gaz ionisé qui se meut dans le conducteur vers lequel la diffusion a lieu, mais bien le conducteur qui se déplace dans le gaz ionisé.

Il fit tomber des gouttes d'eau dans une enceinte traversée par des rayons de Röntgen, et remarqua que les gouttes qui tombaient prenaient d'abord une charge positive, puis une charge négative. Quand l'expérience durait un certain temps, les charges prises par les gouttes diminuaient, mais il suffisait de faire rentrer de l'air pour qu'elles prissent la même valeur qu'au début. Si l'air était complètement enfermé, les charges négatives étaient plus petites que si le vase était ouvert; la charge croissait avec la longueur de la veine liquide, et la pression sous laquelle l'eau s'écoulait. Après le passage de la veine liquide, il restait un excès d'ions positifs dans l'air. L'ammoniaque et le sulfure de carbone se comportaient comme l'eau.

Ces phénomènes peuvent prendre de l'importance en Météorologie.

#### APPLICATIONS A LA MÉTÉOROLOGIE.

19. Elster et Geitel ayant montré par leurs expériences sur la déperdition de l'électricité, la présence d'ions des deux signes dans l'atmosphère, ont cherché à appliquer à l'étude de l'électricité atmosphérique les résultats expérimentaux trouvés pour les ions. L'expérience de Zeleny démontre qu'un conducteur à l'intérieur duquel circule un gaz ionisé prend une charge négative. Elster

---

(<sup>2</sup>) *Drude's Annalen*, 1902.

et Geitel ont en conséquence pensé qu'un conducteur entouré d'un gaz ionisé doit également prendre une charge négative, cette charge cessant d'augmenter quand le champ produit compense la différence de mobilité des ions.

Le globe terrestre est assimilable à un système de ce genre, l'arrivée d'ions négatifs se fera surtout là où le champ produit par la charge propre du globe ne pourra compenser et au delà l'influence de la diffusion; ces régions seront celles qui pourront être regardées comme étant à l'intérieur de la surface conductrice de la Terre; c'est le cas des surfaces recouvertes de végétation. Le champ terrestre est nul entre les troncs d'arbres et les tige des plantes moins élevées; c'est en ces points que se produira l'extraction de l'électricité négative de l'atmosphère; il devra donc y avoir dans ces régions un déficit d'ions négatifs, et un excès d'ions positifs. Ces derniers, quand un état stationnaire sera atteint, viendront neutraliser l'électricité négative de la Terre, qui se renouvellera constamment, le renouvellement de la charge totale de la Terre devant avoir lieu à peu près en cent minutes.

20. Simpson <sup>(1)</sup>, puis Ebert et Ewers cherchèrent à voir si un corps placé dans ces conditions, c'est-à-dire environné d'un gaz ionisé en repos et en mouvement, prend une charge; ils n'en constatèrent aucune.

Les expériences de déperdition montrèrent une égale concentration en ions dans les forêts.

21. Ebert fait la remarque suivante <sup>(2)</sup>. En passant dans un tube métallique, le gaz ionisé prend une charge positive, et le tube une charge négative. Le sol renferme de

---

<sup>(1)</sup> SIMPSON, *loc. cit.*

<sup>(2)</sup> EBERT, *loc. cit.*

petites traces de radium, qui en se désagrégeant émettent de l'émanation, laquelle rend conducteur l'air contenu dans le sol. Quand cet air diffuse dans l'atmosphère, il passe à travers une foule de petits canaux extrêmement étroits, vers les parois desquels les ions négatifs diffusent. Quand la température augmente, ou quand la pression barométrique baisse, l'air contenu dans le sol a une tendance à s'échapper dans l'atmosphère, tandis qu'au contraire un accroissement de pression empêche l'émanation de sortir.

Ebert a remarqué en effet une relation entre la variation diurne du baromètre et celle de l'électricité atmosphérique, mais un accord parfait est impossible, car il faut à l'air un temps notable pour circuler à travers les canaux étroits du sol.

Notons d'autre part que la nature du terrain doit influencer, ainsi que le climat. Par exemple, dans des climats secs, où le sol est susceptible de se fendiller, la correspondance indiquée par Ebert peut se vérifier; mais dans des climats où une baisse barométrique est fréquemment suivie de pluie, la concordance est peu probable.

Simpson a d'ailleurs fait remarquer <sup>(1)</sup> que pour entretenir le champ électrique de l'atmosphère jusqu'à 1000<sup>m</sup> d'altitude, il faudrait un courant d'air vertical de 1<sup>cm</sup> par seconde, et que pour que l'atmosphère reçoive la quantité d'électricité nécessaire, une oscillation barométrique journalière de 17<sup>mm</sup> serait nécessaire.

## CHAPITRE II.

### Travaux personnels sur la diffusion des ions.

22. Mes premières expériences ont été exécutées avec un appareil de fortune pendant la construction de l'appar-

---

(<sup>1</sup>) SIMPSON, *Phys. Zeits.*, t. V, 1904.

reil définitif. Je ne me suis pas attaché à mesurer le coefficient de diffusion pour des tubes métalliques de nature variable; mais j'ai cherché à voir si les conditions expérimentales restant les mêmes, le courant de saturation avait la même valeur pour différents métaux. A cet effet il était absolument nécessaire que le courant gazeux eût une vitesse constante au cours des expériences; je ne pouvais avoir recours à une trompe à eau, et les essais que j'avais faits avec un ventilateur m'avaient donné de mauvais résultats. J'ai utilisé un système d'aspiration reposant sur l'emploi d'un vase de Mariotte avec dispositif de réglage approprié. Deux récipients métalliques de 50<sup>l</sup> environ de capacité, A et B, sont placés l'un au-dessus de l'autre et réunis par un tube de caoutchouc. Un tube de verre plonge dans le réservoir supérieur et est en communication par un tube de caoutchouc avec l'appareil de diffusion. Pour mesurer le débit gazeux, un manomètre de Töpler au xylol est intercalé entre deux points du circuit gazeux très distants l'un de l'autre; dans ces conditions l'eau s'écoulant entre les deux récipients, il suffit de serrer plus ou moins, avec une pince, le tube qui les fait communiquer, pour amener la colonne de xylol à une division quelconque de l'échelle, et par suite pour être assuré que le débit est bien le même au cours des différentes mesures.

Les ensembles de tubes interchangeables ayant mêmes dimensions, le circuit gazeux restait invariable, et par suite en ramenant le niveau du xylol à la même position, la distribution comme la vitesse du courant gazeux était la même dans tous les cas.

23. L'appareil de diffusion est un des appareils de démonstration du cours de M. Langevin (*fig. 4*). Il se compose d'un tube de cuivre de 6<sup>cm</sup> de diamètre, percé

en  $ab$  d'une fenêtre obturée par un tube d'aluminium. A  $10^{\text{cm}}$  environ de la fenêtre, et cela pour avoir une distribution bien uniforme d'ions, se trouvent les tubes de diffusion, au nombre de 24, répartis régulièrement

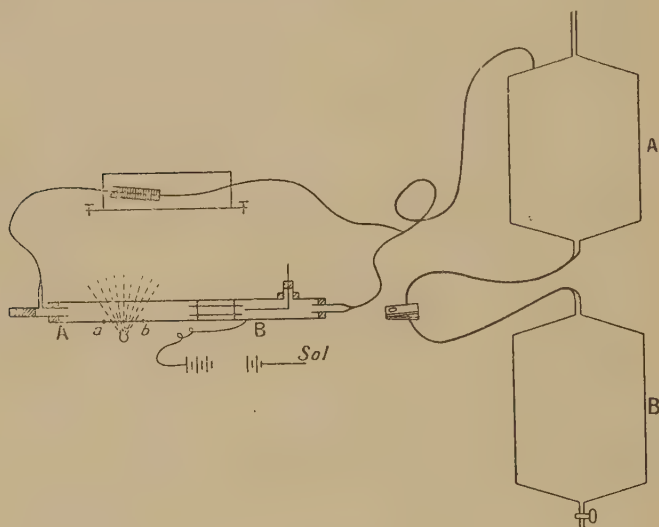


Fig. 4.

le long d'une circonférence; ces tubes sont insérés dans deux disques fixés aux deux extrémités d'un tube de métal obturant parfaitement le tube A B. Face à l'orifice de sortie se trouve l'électrode reliée à l'électromètre, et munie d'un bouchon isolant avec tube de garde. Les tubes de diffusion ont un diamètre de  $2^{\text{mm}}$ .

L'électromètre est du type Curie donnant, sur une échelle à  $1^{\text{m}}$ , de  $30^{\text{cm}}$  à  $40^{\text{cm}}$  de déviation pour 1 volt.

Comme source d'ionisation je me suis servi d'une ampoule de sel radifère de faible activité, placée de façon invariable. Il vaut mieux, dans ces sortes de mesures, avoir une ionisation faible afin d'éviter des pertes importantes dues à la recombinaison.

L'air introduit dans l'appareil a toujours été filtré sur un tampon de coton, afin de le débarrasser des poussières et des ions présents dans le gaz. Le courant d'air doit avoir une intensité telle qu'il se meuve en filets parallèles; un débit de l'ordre de  $100\text{ cm}^3$  est très acceptable.

24. J'ai utilisé deux ensembles de tubes, les uns en étain, les autres en acier.

La mesure se fait de la façon suivante : le courant gazeux étant réglé, l'électromètre est isolé; quand le spot a pris une vitesse constante, on mesure le temps qu'il met à parcourir un certain nombre de divisions. L'expérience est répétée en inversant le signe de la charge de l'appareil. Puis on remplace les tubes de diffusion par d'autres, et ainsi de suite.

Dans ces conditions, j'ai trouvé que les courants de saturation positifs et négatifs étaient les mêmes à la sortie des tubes d'acier qu'à celle des tubes d'étain.

Ces résultats, obtenus avec des métaux aussi différents l'un de l'autre, rendaient improbable une influence sélective de la paroi, mais il était important de le mettre clairement en évidence par les mesures des coefficients de diffusion.

25. *Recherche d'un dispositif.* — Comme on vient de le voir, les mesures étant effectuées avec certain ensemble de tubes étroits, il fallait, pour opérer avec un autre, démonter entièrement l'appareil. Outre l'inconvénient résultant de continuels démontages, on pouvait craindre que les conditions expérimentales eussent varié; par exemple, la position de la fenêtre d'aluminium par rapport à la substance radioactive, ou ce qui est plus grave, la distance de l'électrode aux orifices de sortie des tubes de diffusion. D'autre part, j'avais au début l'intention d'opérer avec un appareil identique au premier appareil de Townsend, et d'opposer les deux courants l'un à l'autre, une paire

de quadrants étant reliée à l'électrode placée à la sortie des tubes courts, et l'autre paire à l'électrode placée à la sortie des tubes longs. Les fenêtres d'ionisation doivent donc être identiques; mais comme je voulais expérimenter à des pressions plus fortes que la pression atmosphérique, je me trouvais obligé de donner aux parois des fenêtres une certaine épaisseur, et l'on pouvait craindre que leurs transparences à l'agent ionisant ne fussent pas identiques. Je me suis donc efforcé d'éviter ces défauts par l'emploi d'un appareil absolument clos, où le changement des ensembles de tubes puisse se faire du dehors par une manœuvre appropriée, et les variations de position des électrodes par des mouvements de basculage ou d'inclinaison de l'ensemble.

26. *Principe de l'appareil.* — Revenons à l'appareil de diffusion de Townsend. Si nous supposons que les deux ensembles de tubes étroits sont disposés l'un et l'autre, dans deux logements diamétralement opposés d'un barillet rotatif analogue à celui d'un revolver, il suffira de faire effectuer à ce barillet une rotation de  $180^{\circ}$  pour substituer un ensemble à l'autre. La mise en place des électrodes peut s'obtenir par des glissements appropriés. Si l'on expérimente, et c'est le cas, avec des tubes de métaux différents, il faudra autant de logements dans le barillet qu'il y aura d'ensemble de tubes; un dispositif avertisseur doit être fixé à l'appareil pour annoncer que l'échange a eu lieu. Tel est le principe de l'appareil que j'ai utilisé. M. Jobin, le constructeur bien connu, a bien voulu accepter de réaliser ce programme, et l'a fait avec une extrême élégance; je tiens à l'en remercier.

La construction et l'étude de ces appareils a été très longue, ainsi que leur mise au point; j'ai été conduit à en transformer plusieurs fois différentes parties, puis à les simplifier,

27. Sur le parcours des tubes  $A_1, A_1, A_2, A_2$  (fig. 5) amenant les gaz ionisés, j'ai intercalé un récipient étanche en bronze de forme cylindrique, fermé par deux plateaux en bronze tourné, portant chacun deux ouvertures opposées où viennent se brancher les tubes  $A_1, A_1, A_2, A_2$ .

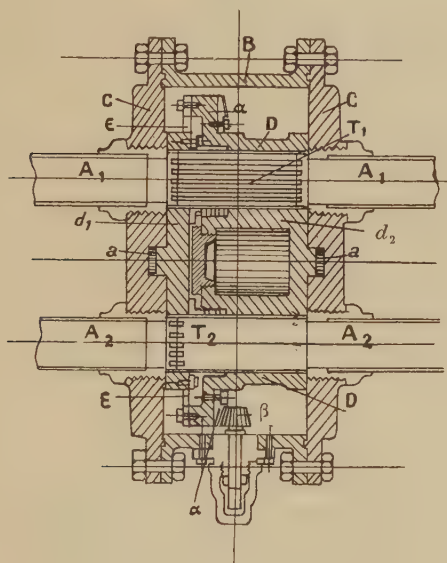


Fig. 5.

Les ensembles  $T_1, T_2$  de tubes de faibles diamètres sont logés dans un bloc cylindrique D tournant à l'intérieur de B autour de deux axes  $aa$ , logés dans deux crapaudines ménagées elles-mêmes dans chacun des plateaux C. Le bloc D se termine par deux faces parallèles rodées sur les deux fonds C pour assurer l'étanchéité; il porte une crémaillère  $aa$  attaquée par un pignon  $\beta$  manœuvrable de l'extérieur au moyen d'une manivelle, l'axe du pignon traversant un presse-étoupes. D est percé de six trous cylindriques équidistants, répartis sur une même circonférence dont le centre est celui de

la face de D. Le mouvement de D au moyen de  $\alpha\beta$  a pour effet d'amener successivement les divers éléments  $T_1$ ,  $T_2$  sur l'un des parcours  $A_1$ ,  $A_2$ . Un top placé à l'intérieur annonce que  $T_1$  et  $T_2$  sont en place, un double top que le groupe acier court est en  $A_2$ ; à cet effet des cames sont placées sur le barillet, et viennent buter contre une tige munie d'un ressort; quand la came est passée, le ressort se détend, et le son sec produit par cette détente donne le signal. Connaissant l'ordre dans lequel les groupes sont placés, il est aisé de savoir avec quel groupe on opère. Ajoutons que le bloc D a été allégé le plus possible, ce qui lui donne vaguement l'apparence d'un barillet de revolver. Le problème de l'étanchéité entre D et B était particulièrement délicat. Le bloc D est en deux pièces  $d_1$  et  $d_2$ , centrées l'une sur l'autre, dressées sur les deux faces, mais assemblées par un joint flexible  $\epsilon$  constitué par une rondelle de cuivre rouge. Quand on opère sous pression, les fuites qui pourraient se produire entre  $T_1$  et  $T_2$  et leurs logements dans D, iront se rassembler dans l'espace compris entre  $d_1$  et  $d_2$ , y exerceront une pression qui fera s'écarter l'une sur l'autre  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , et les appliqueront avec d'autant plus de force que la pression est plus élevée. C'est ainsi qu'avec une pression de plus de  $4^{\text{atm}}$ , aucune fuite ne se produisit comme on s'en est rendu compte en imbibant le presse-étoupes de savon et en suivant le manomètre.

Il faut pouvoir amener les électrodes à une distance invariable des extrémités des groupes  $T_1$  et  $T_2$ ; il est donc nécessaire que ces électrodes puissent se mouvoir dans le sens de  $A_1$ ,  $A_2$  d'une longueur de  $9^{\text{cm}}$  représentant la différence de longueur entre les ensembles  $T_1$  et  $T_2$ .

Les électrodes (*fig. 6*) ont été disposées de la façon suivante : L'électrode équilibrée convenablement repose sur un chemin de roulement; des roulettes latérales assurent sa parfaite mobilité. Ce chemin de roulement

est isolé électriquement par le dispositif habituel à anneaux de garde. *a*, *b* sont les bouchons d'ébonite. En inclinant l'appareil en avant ou en arrière, l'électrode roule dans un sens ou dans l'autre. Au début, désirant

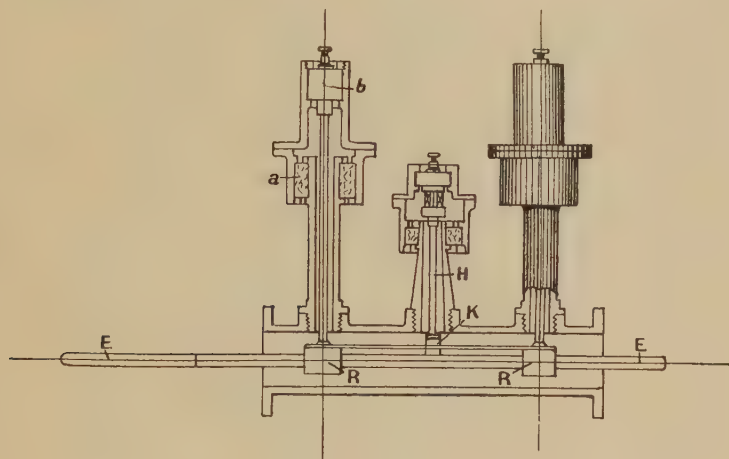


Fig. 6.

équilibrer l'un sur l'autre les courants à la sortie des tubes courts et longs, j'ai fait usage d'un système de butée particulier pour retenir l'électrode. Ce butoir consiste en un pendule *H* à suspension bifilaire formée de deux ressorts plats en acier, il porte un arrêt *K*. On manœuvre le pendule en basculant l'appareil soit à droite soit à gauche. Le même système fonctionne de chaque côté  $A_1 A_1$ ,  $A_2 A_2$  mais les butoirs sont disposés de façon à produire des effets opposés, de telle sorte que si l'électrode est bloquée dans  $A_2 A_2$  elle peut glisser sur son chemin de roulement dans  $A_1 A_1$ .

Dans la suite, opérant seulement avec une moitié de l'appareil, j'ai supprimé les pendules, et me suis contenté de faire basculer soit en avant, soit en arrière pour amener l'électrode à ses positions extrêmes.

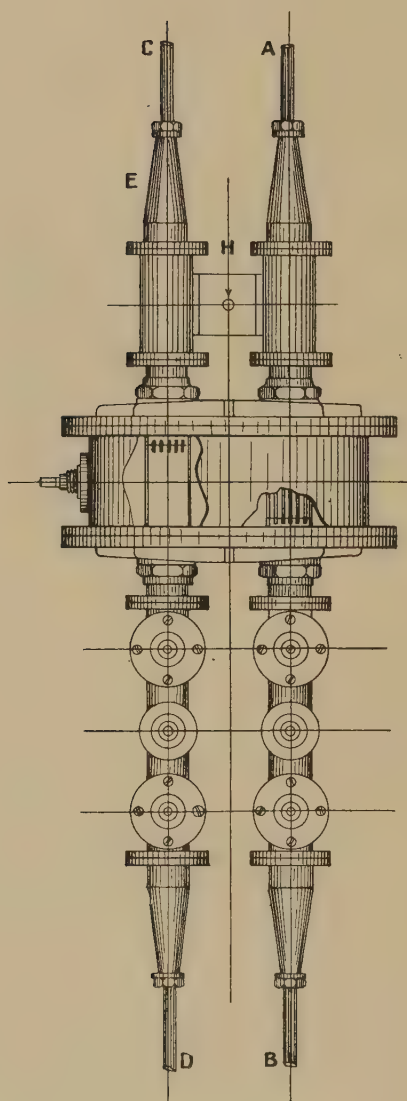


Fig. 7.

Pour incliner l'appareil dans les diverses positions nécessaires à la manœuvre des électrodes, j'ai fait construire un bâti solide pouvant s'incliner d'avant en arrière et de droite à gauche à l'aide de grosses vis de réglage.

La figure 7 donne une vue en plan de l'appareil; le gaz, arrivant par A, entre dans l'appareil par un ajutage conique, passe dans la première moitié de l'appareil, sort en B, entre en C, traverse la seconde moitié de l'appareil, et sort en D pour retourner au gazomètre.

28. J'ai eu beaucoup de peine à rendre étanche un appareil contenant un nombre de joints aussi considérable; tous les joints ont été faits au plomb. La partie la plus délicate a consisté à rendre étanches les électrodes; ce but a été atteint en interposant des rondelles de caoutchouc entre l'ébonite et la pièce de bronze venant serrer l'isolant. Dans ces conditions, après plusieurs mois de tâtonnements, l'appareil devint capable de me rendre les services que j'en attendais.

29. Comme source d'ionisation j'ai pris au début un échantillon de radium placé dans le bloc de plomb H (*fig. 7*), mais la majeure partie du rayonnement était absorbée par le métal des fenêtres, qui avaient une épaisseur relativement considérable afin de ne pas être déformées sous l'influence de la pression. N'ayant pas à ma disposition un échantillon plus actif, j'ai placé dans la partie cylindrique faisant suite au cône d'entrée E du gaz les deux moitiés d'une lame d'argent recouverte de polonium. Ces deux moitiés étaient fixées l'une en face de l'autre; le rayonnement était ainsi parfaitement limité.

30. *Circulation gazeuse.* — L'emploi d'un gazomètre ordinaire était inapplicable : le courant gazeux étant de

l'ordre de  $100\text{ cm}^3$  à la seconde, et l'expérience durant en moyenne 1 minute, il fallait disposer au minimum de  $5^1$  à  $6^1$  de gaz pour chaque mesure, et par suite d'un appareil de très forte capacité. D'autre part, comme il entraînait dans mon programme de faire des expériences à des pressions supérieures à la pression atmosphérique, je me suis trouvé obligé de chercher un dispositif approprié permettant d'expérimenter, toujours avec le même gaz. Il est facile de concevoir un semblable dispositif; on fait passer le gaz d'un récipient dans un autre après lui avoir fait traverser l'appareil de mesure, puis on le chasse à nouveau en sens inverse dans le premier récipient. Je dois dire que Townsend avait agi ainsi, dans quelques-unes de ses mesures, à l'aide de deux gazomètres; Zeleny <sup>(1)</sup> recueillait le gaz à la sortie de l'appareil dans un sac imperméable.

Mon dispositif est inspiré de celui que décrit Regnault dans son premier Mémoire sur les chaleurs spécifiques des gaz. Cet appareil consistait en deux gazomètres, dont les cloches étaient alternativement soulevées et enfoncées par des bielles calées sur un arbre; et cela de façon que l'une s'enfonçait quand l'autre se soulevait; le gaz passait ainsi d'un gazomètre à l'autre après avoir circulé dans l'appareil. Avec un volume restreint de gaz, on peut exécuter un nombre considérable d'expériences. Au lieu de soulever les cloches et de les abaisser, on peut faire circuler le liquide de l'une à l'autre par un mécanisme convenable, de telle sorte que le liquide fasse office de piston. Avec des récipients suffisamment résistants, il devient possible d'expérimenter sur des gaz comprimés; en effet supposons le gaz à une pression quelconque; en déplaçant le liquide d'un récipient à l'autre, on obtiendra un courant de gaz à cette pression. Il est nécessaire que

---

(1) ZELENY, *Ions, Électrons, Corpuscules*, t. II, p. 1116.

l'écoulement se fasse aussi régulièrement que possible; la pompe devra donc avoir un débit faible et un mouvement très rapide. On fabrique aujourd'hui couramment pour le graissage des machines-outils des pompes répondant à cette condition; la partie rotative formant piston est constituée par deux roues dentées engrenant sur un pignon (<sup>1</sup>).

31. Les récipients formant gazomètres, sont constitués par deux bouteilles en acier A et B (*fig. 8*), percées

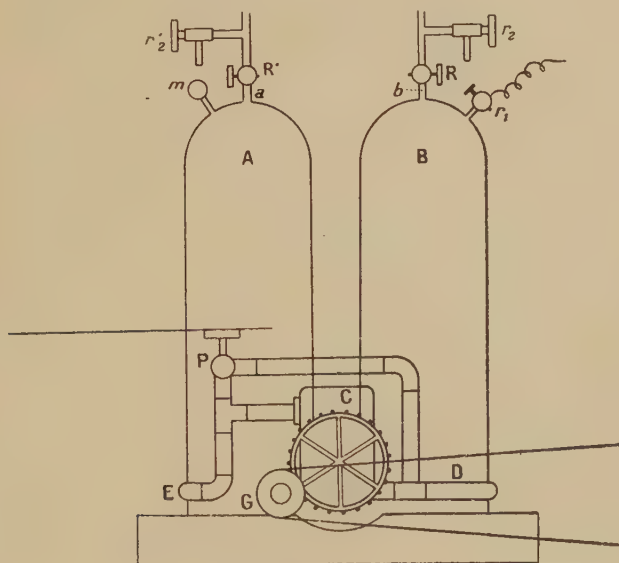


Fig. 8.

dans le bas de deux ouvertures communiquant l'une avec l'autre par l'intermédiaire de la pompe C. A leur

---

(<sup>1</sup>) L'appareil a été construit par la maison Carpentier. Je remercie M. Cartier des soins qu'il a apportés à sa construction, et de l'étude qu'il en a faite.

partie supérieure elles portent chacune deux ajutages; aux deux principaux *a* et *b* sont fixés des robinets R R', sur lesquels sont soudés les tubes métalliques A et B reliés aux appareils; ces tubes sont munis de pointeaux  $r_2, r'_2$ ; les deux autres ajutages sont reliés : pour A à un petit manomètre *m*, et pour B à un robinet  $r_1$ . Chaque récipient d'une capacité de 10<sup>l</sup> environ est également muni d'un niveau (1). De la vitesse de rotation de la pompe, dépendra la vitesse du courant gazeux; on peut donc faire varier cette vitesse en agissant sur le moteur qui actionne la poulie; mais il est préférable d'avoir également un dispositif de réglage permettant d'agir sur l'écoulement du liquide; à cet effet une dérivation est branchée en court circuit sur la pompe rotative D E. Un robinet pointeau P permet de faire varier le courant de liquide dans cette dérivation; ce dispositif constitue par le fait un véritable retour en arrière de liquide.

Comme liquide visqueux, j'avais tout d'abord songé à la glycérine; une dizaine de litres furent introduits dans les récipients; la circulation par la pompe se faisait admirablement, mais ce corps présentait un gros inconvénient : il est très hygroscopique; aussi, pendant les essais, de l'air humide ayant été introduit dans l'appareil, les gaz présentaient des traces d'humidité. En conséquence l'appareil fut vidé et nettoyé à l'eau, l'alcool et l'éther. J'introduisais alors 10<sup>l</sup> d'huile de vaseline blanche; c'est avec ce liquide que presque toutes les expériences ont été exécutées.

32. Pour remplir de gaz l'appareil, il eût été facile de faire le vide et de faire rentrer du gaz et ainsi de suite; presque tous les gaz dont je me suis servi étant comprimés

---

(1) Ces niveaux sont placés du côté opposé à la pompe, et occupent presque toute la hauteur des récipients. J'ai supprimé sur la figure le volant fixé au pignon G.

dans des bouteilles d'acier, j'ai préféré opérer différemment, et je dois dire que j'ai obtenu une pureté tout à fait suffisante. Pour cela le liquide étant amené dans le récipient B, je fermais R, puis j'ouvrais  $r_1, r_2$  et le pointeau P de la dérivation liquide; le gaz entraînait alors par  $r_1$ , refoulait le liquide dans A; le gaz contenu dans A était chassé par les canalisations à travers l'appareil de diffusion, puis sortait par le robinet  $r_2$ . Tout le liquide étant passé dans A, je fermais  $r_1$  et  $r_2$ ; j'avais alors introduit dans B 8<sup>l</sup> de gaz nouveau. Le robinet R étant ouvert, la pompe était mise en marche, je faisais circuler les gaz plusieurs fois alternativement dans un sens et dans l'autre, afin de les mélanger. J'avais alors 8<sup>l</sup> de gaz nouveau, CO<sup>2</sup> par exemple, plus la quantité d'air qui se trouvait au-dessus du liquide quand ce dernier remplissait B, ainsi que l'air contenu dans les canalisations et l'appareil de diffusion; un calcul approximatif m'a montré que ce volume résiduel n'était pas la moitié du volume introduit. J'avais donc un mélange approximatif

$$V_{CO^2} + \frac{V}{2} \text{ air.}$$

Répétant la même opération, le volume de gaz résiduel devient  $\frac{V}{2^2}$  et après la  $n^{\text{ième}}$  opération  $\frac{V}{2^n}$ ; je m'arrêtais en général à la dixième ou douzième opération; à la dixième le volume de gaz résiduel n'était pas la partie millième du volume primitif.

Avant d'entrer dans le gazomètre, le gaz traversait des colonnes desséchantes de chlorure de calcium, anhydride phosphorique, et éventuellement de ponce sulfurique. Les desséchants étaient contenus dans des tubes de verre de 4<sup>cm</sup> de diamètre, étirés aux deux extrémités et reliés les uns aux autres par des tubes métalliques mastiqués sur la partie étirée. Le gaz provenant de la bouteille passait d'abord par un robinet à trois voies

relié d'une part aux colonnes desséchantes, et de l'autre à un barboteur, afin de régler approximativement le débit; le gaz n'était lancé dans les desséchants, que le réglage une fois fait. Ce système de dessiccation est sans danger avec des pressions qui ne sont pas trop fortes.

J'ai supprimé les desséchants liquides tels que l'acide sulfurique, car au début de mes essais l'acide avait été projeté de tous les côtés par suite du détachement d'un tube.

33. Il était également nécessaire de s'assurer que la circulation gazeuse se faisait sans à-coups. Dans ce but j'ai intercalé un manomètre de Töpler à xylol <sup>(1)</sup>, entre deux points très distants l'un de l'autre du circuit gazeux; j'observais le ménisque avec une forte loupe; derrière le tube du manomètre se trouvait une échelle sur verre graduée en demi-millimètres. La pompe mise en marche et le ménisque du manomètre amené sur une division déterminée, je m'aperçus que pour le maintenir fixe, il était nécessaire d'agir de façon continue sur le robinet pointeau P de la dérivation liquide. Afin de faciliter cette manœuvre, ce robinet fut muni d'une tige fixée sur la vis. Il était facile de maintenir le ménisque à la division déterminée de l'échelle, car au bout de quelque temps il se fait une éducation de la main, telle que l'on tourne instinctivement d'une manière continue la tige fixée au robinet.

34. Ces expériences me montrèrent aussi qu'il se produisait des à-coups très légers mais observables; au début, afin de les supprimer, j'ai intercalé dans le parcours du

---

(1) Cet indicateur de vitesse a été utilisé je crois pour la première fois par M. Eugène Bloch (*Ann. de Chim. et Phys.*, 8<sup>e</sup> série, t. IV, 1905, p. 48).

gaz un récipient de métal formant volant gazeux, mais dans la suite je l'ai supprimé. Le pignon denté ayant été fixé de manière plus robuste, et un volant lui ayant été adjoint, ces à-coups ont totalement disparu; le courant

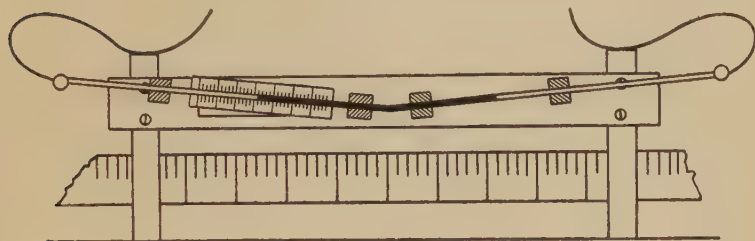


Fig. 9.

gazeux amené à l'appareil de diffusion pouvait donc être considéré comme constant.

La figure 9 donne une vue du manomètre et de son support.

35. Pour connaître la vitesse du courant gazeux, les niveaux étant gradués en litres et dixièmes de litre, il suffit de mesurer le temps mis par le liquide pour parcourir un intervalle connu sur les niveaux, le régime étant constant. J'ai essayé de faire la mesure seul; mais comme je devais maintenir le débit constant, et par conséquent surveiller le manomètre tout en agissant sur la tige commandant le pointeau de la dérivation liquide, j'ai été obligé d'avoir recours à un aide. Les mesures s'exécutaient de la façon suivante : tout le liquide étant ramené dans A, la pompe était mise en action pour le ramener dans B; le débit était alors rapidement réglé et maintenu soigneusement constant; un aide mesurait alors au chronomètre le temps mis par le liquide dans le tube niveau, pour passer

par exemple de la division de  $2^1$  à celle de  $5^1$ . Ces mesures ont été faites par MM. Villey, Bialobjesky, Rey qui travaillaient au Laboratoire, et par l'excellent mécanicien du Laboratoire M. Pierre Lalance; je les remercie bien sincèrement de leur obligeance à m'aider.

Voici un exemple pris sur le cahier d'expériences :

*Gaz* CO<sup>2</sup>. — Observateur : M. Tcheslas Bialobjesky.

Pour  $3^1 \dots$      $34^s,8$      $34^s,6$      $34^s,8$      $34^s,6$      $34^s,6$      $34^s,6$      $34^s,5$   
(Moyenne :  $34^s,66$ .)

Soit  $88^{cm^2},58$  par seconde. Débit correspondant à chaque petit tube :  $U = 7^{cm^2},38$ .

36. *Conditions de régime gazeux*. — Le gaz doit s'écouler dans les tubes en filets parallèles; c'est ce qui est impliqué (n° 6) par la formule de Poiseulle, que nous avons appliquée, pour connaître la vitesse en un point situé à une distance  $r$  de l'axe :

$$W = \frac{2V}{a^2} (a^2 - r^2).$$

Il faut donc que les conditions expérimentales soient telles qu'un semblable régime s'établisse.

En réalité il n'est pas facile de se rendre compte de ce qui se passe à l'intérieur d'un fluide en mouvement, s'il y produit des remous et des tourbillons. O. Reynolds a tourné la difficulté en produisant dans un courant d'eau des bandes colorées; si ces bandes s'écoulent en ligne droite dans le sens du courant, c'est que le régime a lieu en filets parallèles; au cas contraire, on remarque une déformation ou une diffusion des bandes colorées. Quand la vitesse ne dépasse pas une certaine valeur que Reynolds appelle *la vitesse critique*, le fluide s'écoule en filets parallèles; pour une vitesse supérieure il y a

des tourbillons; enfin, si la vitesse est moindre qu'une seconde vitesse critique, le régime s'établit de lui-même, même si le mouvement était primitivement irrégulier.

O. Reynolds a déduit de ses recherches la règle suivante : l'écoulement en filets parallèles s'établit si l'on a

$$\frac{U\rho}{\pi a\mu} < 700,$$

$U$  étant le débit,  $\rho$  le densité du fluide,  $\mu$  son coefficient de viscosité,  $a$  le rayon du tube.

Avec le débit indiqué plus haut, on avait pour l'air

$$\frac{U\rho}{\pi a\mu} = 150,$$

ce qui est bien au-dessous de la limite indiquée.

37. Dans les mesures électrométriques, la méthode la meilleure est certainement la méthode de compensation, mais elle exige que l'opérateur ait les deux mains libres. Or, comme il fallait que je régularise le débit gazeux, force m'était d'utiliser une autre méthode qui me permît d'exécuter en même temps les deux opérations : régularisation du débit gazeux, mesures électriques.

Au début j'ai employé la méthode de la déviation : elle consiste à mesurer le temps que met le spot à parcourir un certain nombre de divisions de l'échelle. Connaissant par un étalonnage la quantité d'électricité correspondant à une division, il est facile d'en déduire la densité des charges présentes dans le gaz. D'après M. Moulin, il faut au préalable laisser dévier l'aiguille pendant 10 à 15 secondes, temps après lequel le spot se déplace de façon uniforme sur l'échelle.

Dans cette méthode il est nécessaire pour l'étalonnage de relier de façon constante à l'électromètre un condensateur de capacité connue, dont une armature reste

au sol pendant les mesures. Les expériences exécutées, on isole alors l'électromètre, et l'on porte à un potentiel connu  $E$  de quelques volts l'électrode du condensateur primitivement au sol, l'électromètre dévie de  $n$  divisions; une division correspond à

$$\frac{C.E}{n \times 300} \text{ U. E. S.}$$

Soit  $U$  le débit gazeux,  $T$  le temps que le spot aura mis à parcourir  $N$  divisions, la densité des charges sera

$$\sigma = \frac{C.E.N}{T.n \times 300} \text{ U. E. S.}$$

Il suffira donc de déterminer  $\sigma_c$  à la sortie des tubes courts,  $\sigma_l$  à celle des tubes longs, puis  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  pour les deux positions de l'électrode en l'absence de tubes de diffusion; on aura toutes les données nécessaires pour calculer le coefficient de diffusion.

Cette méthode présente divers inconvénients : d'abord il est nécessaire de laisser l'aiguille dévier 12 à 15 secondes avant de commencer la mesure, ce qui est incommode avec des courants intenses; de plus le spot a pu se déplacer de sa position de repos sur l'échelle; la sensibilité de l'électromètre a pu varier, enfin les fuites électriques prennent une importance beaucoup plus considérable qu'avec une méthode de compensation.

38. Je préfère employer une méthode imaginée par M. Moulin. L'armature  $A$  du condensateur d'étude (*fig. 10*) est reliée à la paire de quadrants 1 de l'électromètre. L'autre paire est mise au sol. On relie ensuite à la paire de quadrants 1 l'armature d'un condensateur  $C$  de capacité connue, dont l'autre armature peut communiquer à l'aide d'une clef à décharge, soit avec le sol, soit

avec le pôle d'une batterie de piles dont l'autre pôle est au sol.

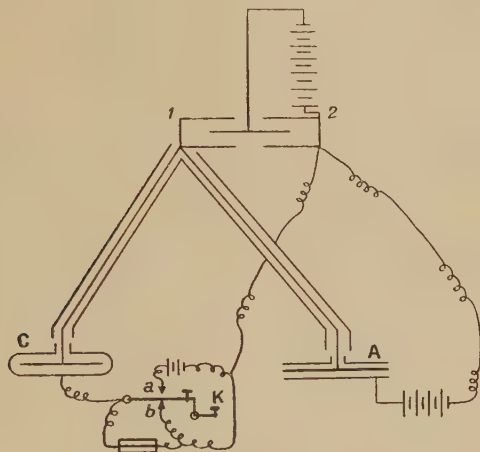


Fig. 10.

Dans ces conditions la paire de quadrants 1 étant isolée, le courant à mesurer  $i$  transporte à cette paire de quadrants une quantité d'électricité qui est proportionnelle au temps; l'aiguille dévie et le spot se déplace sur l'échelle. Au moment où le spot passe par une division  $n$ , on fait partir un chronomètre, puis on déclenche la clef, le levier P se redresse et vient appuyer contre le contact  $a$ , l'armature du condensateur primitivement au sol se charge; l'aiguille de l'électromètre part en sens inverse si les connexions sont en sens convenable, elle revient ensuite, puis on arrête le chronomètre quand elle repasse par la division  $n$ . Soit  $T$  le temps écoulé entre ces deux passages; le courant  $i$  aura apporté une quantité d'électricité compensant exactement la quantité d'électricité induite par influence

$$\frac{CV}{T \times 300} \text{ U. E. S.}$$

Cette méthode a beaucoup d'avantages, d'abord elle n'est pas pénible comme certaines méthodes de compensation; elle donne des mesures en valeur absolue, toujours comparables, et indépendantes des variations de sensibilité de l'électromètre, ou des changements de zéro sur l'échelle.

J'ai appliqué cette méthode comme l'a fait M. Moulin, c'est-à-dire en ayant soin que la valeur moyenne du potentiel sur la paire de quadrants 1 soit sensiblement zéro; pour cela on choisit les valeurs de  $V$  et de  $n$  telles qu'au moment de l'induction de la charge dans le condensateur  $C$ , le spot dévié de  $2n$  divisions en sens inverse, de cette façon la variation de potentiel qui résulte de cette induction pour le conducteur isolé ne peut introduire de perturbations. Dans ce cas également, l'importance des fuites se trouve diminué. M. Moulin recommande également de prendre  $T$  assez grand pour réduire l'importance de l'erreur provenant de ce que l'aiguille ne dévie pas instantanément.

Le condensateur que j'ai utilisé est un étalon secondaire Moulin-Baudouin de 30 U. E. S.

Ainsi que l'indique la figure 11, l'échelle de l'électromètre se trouve disposée au-dessous du manomètre à xylol.

Il est facile, pendant le réglage du débit du courant gazeux, de surveiller le moment où le spot passe par la division choisie; aussi faut-il n'employer pour viser le ménisque de xylol qu'un grossissement faible, afin d'éviter de trop grandes différences d'accommodation. Dans ces conditions, on manœuvre le levier de réglage de dérivation liquide de la main gauche, tandis que de la droite on met en marche le chronomètre et l'on actionne la clef de décharge. Avec un peu d'entraînement, on arrive à mener à bien toutes ces opérations simultanément, bien que cela soit assez pénible à la longue.

39. *Montage général.* — La figure 11 donne une vue du montage général des appareils. L'appareil de diffusion E est monté sur sa plateforme Z, il est relié aux cylindres du

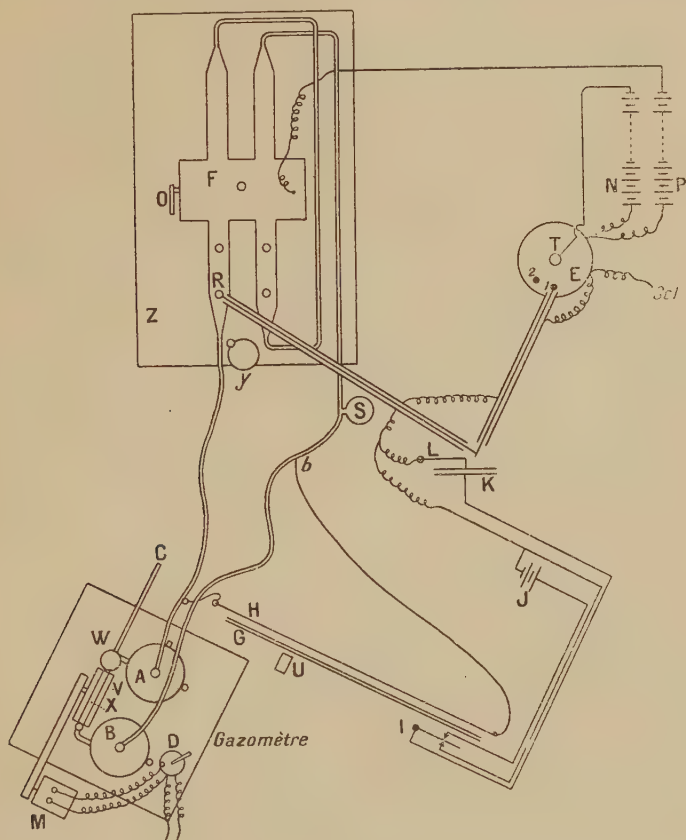


Fig. 11.

gazomètre A et B par des tubes de laiton suffisamment souples pour ne pas s'opposer aux mouvements de basculage, ceux-ci s'effectuent en tournant le volant Y. Un manomètre S est branché sur le circuit gazeux pour indiquer la pression à laquelle on opère. En deux points *a*

et *b*, éloignés l'un de l'autre, sont fixés deux tubes souples en métal, reliés aux extrémités du manomètre à xylol H; celui-ci est placé au-dessus de la règle divisée G. La pompe V est mise en mouvement par le moteur à courant continu M <sup>(1)</sup>.

L'électrode R de l'appareil à diffusion est reliée d'une part à une paire de quadrants de l'électromètre E, de l'autre au condensateur K, par des conducteurs fixés par des bouchons d'ambroïde dans des tubes métalliques mis au sol; toutes les connexions sont elles-mêmes protégées électrostatiquement.

On met au sol la paire de quadrants reliée au système électrode-condensateur, à l'aide de la clef L. J'ai employé plusieurs modèles de clefs. La partie principale consistait toujours en une aiguille d'acier venant poser par sa pointe sur la vis de la borne du condensateur; j'ai préféré la mettre à cet endroit, plutôt que de la faire reposer sur la borne I de l'électromètre; et cela afin d'éviter les secousses qui pouvaient avoir lieu au moment où l'on soutenait l'aiguille. Au début, cette dernière était mise en mouvement par un électro-aimant. Dans la suite je l'ai fixée simplement à un levier posé sur un axe, manœuvrée par un fil. Le tout se trouvait sur un pied à vis calantes permettant de régler de façon précise la position de l'aiguille. Comme l'a indiqué M. Langevin, il est nécessaire qu'en soulevant l'aiguille, celle-ci s'élève bien verticalement, sans quoi il se produirait un léger frottement, d'où perturbation à l'électromètre. La partie plate sur laquelle reposait l'aiguille était frottée de temps en temps avec du papier émeri très fin; dans ces

---

(1) Toute la tuyauterie, les robinets, ont été fournis par la maison Lequeux. Je tiens à remercier M. Lequeux de son obligeance vis-à-vis de moi; non seulement il mettait, quand j'en avais besoin, un de ses mécaniciens immédiatement à ma disposition, mais encore il n'hésitait pas à me prêter des appareils.

conditions on n'avait aucun déplacement du spot, quand on soulevait l'aiguille. L'électromètre employé était un électromètre Curie; sa sensibilité était telle qu'on obtenait une déviation de 1<sup>m</sup> pour 1 volt environ. L'électromètre était posé sur un pied Boys, reposant lui-même sur un bloc de pierre. J'ai du intercaler une lame de caoutchouc, afin d'éliminer les vibrations venant du dehors. Il est nécessaire d'éloigner l'électromètre Curie de toute source de chaleur (radiateur, poêle) sans quoi il se produit dans la cage de l'appareil des courants de convection amenant un déplacement du zéro, et capables d'introduire dans certains cas des perturbations.

Tout le dispositif était réuni dans un petit bâtiment élevé au pied de la tour du Collège de France, où Regnault fit ses mémorables expériences sur la loi de Mariotte; bien que l'endroit fût humide, les isolants à l'ambroïde se sont bien comportés; je les ai nettoyés d'ailleurs fréquemment.

40. *Marche d'une expérience.* — On commence par mettre la pompe en marche de façon à faire passer tout le liquide dans le cylindre A, puis on renverse le sens du courant électrique sur le moteur et le liquide revient de A en B; on amène à l'aide du levier C commandant le pointeau W le ménisque de la colonne de xylol à la division voulue. Lorsque le débit gazeux est bien constant, on soulève la clef de mise au sol L, le spot se déplace sur l'échelle. Tout en surveillant le ménisque, et en réglant le débit, on guette le moment où le spot vient à passer par la division déterminée de la règle, la mesure électrique s'exécute comme je l'ai dit plus haut.

Après plusieurs opérations de ce genre, on change le groupe de tubes de diffusion. Supposons que ce soit avec les tubes courts que l'on vienne d'opérer, on fait basculer

l'appareil d'un certain angle à l'aide du volant Y; l'électrode glisse sur son chemin de roulement, il est aisé d'entendre le bruit qu'elle fait en venant buter contre son arrêt; à ce moment on tourne la manivelle O, pour remplacer les tubes courts par les longs. Au troisième *top* la manivelle est arrêtée, la manœuvre est terminée.

On reprend alors les mêmes mesures. Mais comme la densité des charges dans le gaz à la sortie des tubes longs est plus faible, il devient nécessaire de modifier le voltage de charge du condensateur K.

Quand un certain nombre d'expériences a été fait, on remplace les tubes longs par les tubes courts et ainsi de suite.

On effectue ensuite la correction pour le nombre d'ions qui ont disparu par recombinaison (n° 8). Pour cela on tourne la manivelle O de façon à mettre en place une cavité du barillet dépourvue de tubes de diffusion, et l'on mesure le courant pour les deux positions extrêmes des électrodes. Cette cavité dépourvue de tubes se trouve dans le barillet à la place d'un ensemble de tubes courts; de cette façon la perte de charge dans le circuit gazeux se trouve peu changée. En conséquence on peut ramener le ménisque de xylol à la division voulue, sans modifier sensiblement la position de début du robinet pointeau W.

Une dernière mesure reste à faire, c'est celle du débit; on l'exécute, comme je l'ai dit plus haut, avec l'aide d'un autre opérateur. Tous les éléments du calcul sont alors obtenus.

#### RÉSULTATS.

41. *Air*. — Le premier gaz sur lequel ont porté mes expériences est l'air. L'air introduit dans l'appareil était celui de la pièce, desséché par passage sur des colonnes de ponce sulfurique et de chlorure de calcium; contrairement à ce qui a eu lieu pour les autres gaz, le

remplissage n'a pas été fait par déplacement à l'aide du gaz comprimé. Le robinet  $r_1$  (fig. 11) était relié aux colonnes desséchantes, puis R fermé et  $r_2$  ouvert; la pompe était alors mise en marche, la dérivation liquide ouverte en grand; l'appel d'air se faisait très lentement. L'opération pour le reste fut conduite comme il a été dit plus haut.

Mes premières mesures ont porté sur l'effet sélectif que devait jouer la nature de la paroi, d'après J.-J. Thomson et Rutherford. Voici les résultats obtenus :

| Métal.           | D <sub>+</sub> . | D <sub>-</sub> . |
|------------------|------------------|------------------|
| Maillechort..... | 0,031            | 0,041            |
| Laiton.....      | 0,031            | 0,041            |
| Acier.....       | 0,032            | 0,043            |

La correction de recombinaison n'a pas été faite pour ces trois mesures. Dans la suite j'ai opéré uniquement avec les tubes de laiton. Une longue série d'expériences m'a donné les résultats suivants :

| D <sub>+</sub> . | D <sub>-</sub> . | D moyen. | Rapport des valeurs<br>de D. |
|------------------|------------------|----------|------------------------------|
| 0,032            | 0,042            | 0,037    | 1,31                         |

*Azote.* — L'azote m'a été fourni par la Compagnie des gaz comprimés, qui met dans le commerce ce gaz préparé par distillation de l'air liquide. Sa pureté garantie est 99,5 pour 100. Sa dessiccation a eu lieu sur la potasse, le chlorure de calcium et l'anhydride phosphorique.

| D <sub>+</sub> . | D <sub>-</sub> . | D moyen. | Rapport des valeurs,<br>de D. |
|------------------|------------------|----------|-------------------------------|
| 0,0295           | 0,0414           | 0,035    | 1,41                          |

*Anhydride carbonique.* — L'anhydride carbonique que j'ai employé est un gaz industriel préparé par combustion du coke; j'ai rejeté les préparations industrielles provenant de la fermentation, à cause de leur odeur fortement aromatique, craignant que la présence d'im-

puretés volatiles n'alourdissent les ions. Une analyse m'a montré que la teneur en  $\text{CO}_2$  était supérieure à 99 pour 100. La dessiccation a été effectuée par le chlorure de calcium et l'anhydride phosphorique.

| D <sub>+</sub> . | D <sub>-</sub> . | Rapport des valeurs |       |
|------------------|------------------|---------------------|-------|
|                  |                  | D moyen.            | de D. |
| 0,025            | 0,026            | 0,025               | 1,04  |

*Oxygène.* — L'oxygène provenait également de la distillation fractionnée de l'air liquide. Une analyse obligeamment faite par M. Hackspill a montré que la teneur était supérieure à 99,5 pour 100.

| D <sub>+</sub> . | D <sub>-</sub> . | Rapport des valeurs |       |
|------------------|------------------|---------------------|-------|
|                  |                  | D moyen.            | de D. |
| 0,030            | 0,041            | 0,035               | 1,46  |

42. J'ai tenté des expériences avec l'hydrogène; le gaz qui m'avait été fourni était un gaz industriel préparé par voie électrolytique et comprimé. J'ai été fort surpris de voir, que contrairement à mes prévisions, l'ionisation dans ce gaz était beaucoup plus forte que dans l'air; or, c'est le contraire qui a été observé. De plus, les deux ions présentaient une dissymétrie très remarquable, l'ion — diffusait beaucoup plus vite que l'ion +. La cause de ce phénomène tient très probablement à ce que les compresseurs sont lubrifiés avec des éthers de pétrole, et que le gaz est souillé par des traces de ces vapeurs. On sait d'ailleurs qu'il suffit de traces de certaines vapeurs dans l'hydrogène, pour qu'une ionisation intense se produise, et l'absorption présentée par l'hydrogène contenant des vapeurs d'éther de pétrole à certaines radiations, est bien supérieure à celle que ce gaz présente quand il n'en contient pas (Gowdy).

43. J'ai exécuté des mesures de coefficients de diffusion dans l'air et l'azote à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. Comme je l'ai dit, l'appareil

avait été rendu étanche; malheureusement, par suite d'une fausse manœuvre, probablement sur un porte-électrodes, une légère fuite se déclara qu'il me fut impossible de localiser; un montage et remontage complet eût été fort long, et l'échantillon de polonium que j'avais à ma disposition baissait de plus en plus d'activité. J'ai donc préféré remplir l'appareil au fur et à mesure que la pression baissait, j'avais du reste le temps d'exécuter plusieurs mesures; les nombres ont été suffisamment concordants pour légitimer ce mode opératoire. Je comprimai un quart de division au-dessus de la pression choisie, et je continuais les expériences jusqu'à ce que la pression ait diminué d'une quantité égale. Le manomètre était un manomètre métallique gradué en kilogrammes, chaque division valait  $\frac{1}{5}$  de kilogramme. Pour l'air j'ai employé une pompe à main; dans le cas de l'azote, la bouteille était reliée directement aux colonnes desséchantes.

Une mesure pour l'air m'a donné :

| H pression en mm. | $D_+$ | $H \times D_+$ | $D_-$ | $H \times D_-$ |
|-------------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 1128.....         | 0,022 | 24,8           | 0,037 | 30,4           |

En conséquence, pour l'air, j'ai obtenu les résultats suivants :

| Pression en mm. | $D_+ \times H.$ | $D_- \times H.$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| 760.....        | 24,2            | 31,8            |
| 1128.....       | 24,8            | 30,4            |

Pour l'azote les valeurs trouvées sont les suivantes :

| Pression en mm. | $D_+ \times H.$ | $D_- \times H.$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| 760.....        | 22,4            | 31,4            |
| 1000.....       | 23              | »               |
| 1120.....       | 22,4            | 31,3            |
| 1302.....       | »               | 33,9            |

## CONCLUSIONS.

44. Les mesures des coefficients de diffusion exécutées avec des tubes de maillechort, de laiton ou d'acier ont donné des résultats qui sont en bon accord, étant donnée la précision de la méthode, environ 5 pour 100. Je ne crois pas qu'il soit facile d'obtenir mieux.

Dans des expériences préliminaires, j'avais reconnu que les conditions expérimentales restant identiques, à la sortie de tubes de diffusion d'acier ou de laiton, les courants de saturation positifs étaient les mêmes. Il en était ainsi également pour les courants de saturation négatifs. Je crois donc pouvoir conclure *qu'une influence due à la nature de la paroi sur le mécanisme de diffusion des ions est bien improbable*. C'est la conclusion à laquelle Eve <sup>(1)</sup> a cru devoir se ranger, à la suite de recherches postérieures aux miennes, qu'il ne cite du reste pas. Étudiant le fonctionnement du collecteur d'ions d'Ébert, il faisait passer le gaz ionisé à l'intérieur de tubes métalliques, dans le but d'étudier le rôle de la diffusion dans ces tubes. Les résultats étaient les mêmes, que les tubes fussent en aluminium ou en étain.

45. Examinons maintenant les valeurs des coefficients de diffusion dans le cas de l'air. Pour les ions négatifs, la valeur que j'ai trouvée 0,042 est en bon accord avec celle de Townsend 0,043, la différence entre les deux nombres est inférieure à la précision de la méthode. Franck et Westphal avaient trouvé 0,044 (rayons de Röntgen); malheureusement il est impossible de déduire de leurs recherches les valeurs pour chaque ion, dans le cas où l'ionisation a été produite par les rayons  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$ , le Mémoire ne contenant que le coefficient moyen.

---

(<sup>1</sup>) EVE, *Phil. Mag.*, t. XIX, 1910, p. 657.

En ce qui concerne les ions positifs, l'accord entre les différentes valeurs obtenues est moindre. Mais il faut écarter le cas des rayons de Röntgen, à cause des ions à charge double qui peuvent être formés, comme l'a indiqué Townsend. Les circonstances de production de ces ions ne sont pas encore précisées avec suffisamment de certitude; néanmoins les expériences de Townsend ont montré que les rayons secondaires, et l'état de propreté de la surface d'émission, jouaient un rôle prédominant dans la production de ce curieux phénomène. Si j'examine maintenant les ions positifs produits par les rayons  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$ , l'accord est meilleur : 0,031 (Townsend), 0,032 d'après mes expériences. J'avais trouvé d'autre part 0,031 lors de mes premières expériences, les conditions expérimentales étant sensiblement les mêmes. Townsend, frappé de la discordance entre les nombres différents qu'il avait trouvés lorsque l'ionisation était produite par les rayons de Röntgen ou par ceux du radium, avait pensé à une action de la température, les mesures dans le second cas avaient été exécutées à 19°, et à la pression H de 772<sup>mm</sup>, et le produit  $H \times D$  était égal à 24,5. A d'autres pressions et avec la même source d'ionisation, le produit  $H \times D$  était égal à 23,1 environ, la température ayant oscillé entre 12° et 16°. Le rôle de la température n'ayant pas été étudié expérimentalement, il est difficile de préjuger de son influence pour des variations aussi faibles. En tout cas le produit  $H \times D$  que j'ai déduit de mes expériences est en accord avec la valeur 24,5 trouvée par Townsend. Il est possible que la différence entre les diverses valeurs tiennent à une trace d'humidité. Il est d'ailleurs difficile de dessécher un appareil formé de masses métalliques aussi volumineuses que celles qui formaient le mien. J'avais néanmoins pris toutes les précautions possibles. Mon intention était de recommencer mes expériences

avec un autre échantillon de polonium, le mien n'étant plus très actif, mais le seul que j'ai pu me procurer avait une activité beaucoup trop faible pour me permettre d'exécuter de nouvelles mesures.

46. Les coefficients de diffusion trouvés pour l'anhydride carbonique sont en accord avec ceux donnés par Townsend; malheureusement, si l'on cherche à en déduire la valeur du produit  $Ne$ , on s'aperçoit que les résultats ne sont acceptables que si l'on prend comme mobilité la demi-somme des mobilités déterminée par Rutherford; si au contraire on choisit les mobilités mesurées par Langevin d'une part, et Zeleny de l'autre, le produit  $Ne$  est plus petit que 1. Il en résulte donc que le gaz carbonique industriel contient des impuretés, qui augmentent la valeur du coefficient de diffusion de l'un et l'autre ion. Étant donné que Rutherford n'indique pas la provenance du gaz qui a servi à ses mesures, il est difficile de conclure que l'accord relatif obtenu pour  $Ne$  tient à ce que dans les deux cas le gaz contenait les mêmes impuretés <sup>(1)</sup>.

Les résultats des mesures effectuées avec l'oxygène montrent une certaine discordance avec ceux de Townsend, 0,041 au lieu de 0,0396 pour les ions négatifs, et 0,30 au lieu de 0,25 pour les positifs. Je ferai remarquer tout d'abord que mon oxygène était beaucoup plus pur que le sien, qui contenait seulement 94 pour 100 environ d'oxygène. De plus, Townsend ionisait le gaz par les rayons de Röntgen et dans ce cas il peut y avoir formation d'ions à charge double, ce qui tend à abaisser le coefficient de diffusion. Enfin, j'estime qu'étant données les dimensions moléculaires de l'oxygène et de l'azote, on pouvait s'attendre à trouver des valeurs assez semblables pour tous les deux.

---

(1) J'ai cherché à savoir comment les industriels lubrifiaient leurs compresseurs, aucune réponse ne m'a été donnée.

47. Dans le cas de l'azote, si l'on considère les expériences faites avec les ions négatifs aux pressions de  $760^{\text{mm}}$  et  $1120^{\text{mm}}$ , l'accord est bon; à  $1320^{\text{mm}}$  le coefficient est trop fort; deux séries de mesures, effectuées à des pressions voisines de  $3^{\text{atm}}$ , ont donné l'une et l'autre des résultats tout à fait incompréhensibles.

Si l'on considère les résultats relatifs aux ions positifs, on voit que pour  $760^{\text{mm}}$ ,  $1000^{\text{mm}}$  et  $1120^{\text{mm}}$  de pression les produits  $H \times D$  sont sensiblement constants. Comme mon polonium n'était plus assez actif, je n'ai pu pousser les mesures plus loin. Néanmoins ces faits me semblent démontrer, qu'aux erreurs d'expériences près, le coefficient de diffusion varie en raison inverse de la pression pour des pressions supérieures à la pression atmosphérique, entre les limites où j'ai opéré.

---

## DEUXIÈME PARTIE.

## CHAPITRE 1.

Détermination de  $\frac{k}{D}$  par M. Townsend.

48. La valeur du produit  $Ne$  déduite de la connaissance de la mobilité et de la diffusion sera d'autant plus précise, qu'il y aura moins d'incertitude sur chacun de ces facteurs; or si leur détermination a été effectuée par des expérimentateurs différents, on ne peut être absolument certain que les circonstances expérimentales sont restées les mêmes. En conséquence il y aura tout avantage à déterminer directement  $\frac{k}{D}$ .

MÉTHODE DE TOWNSEND (<sup>1</sup>).

49. Deux plateaux métalliques horizontaux A et B (fig. 12) sont percés chacun d'un trou circulaire de même

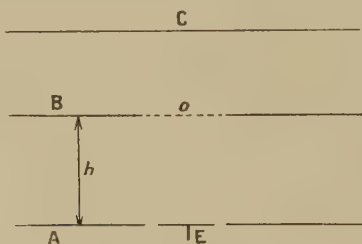


Fig. 12.

rayon; les centres de ces trous se trouvent sur la même verticale. Une toile métallique couvre le trou supérieur, un disque isolé E, laissant autour de lui un sillon d'air,

(<sup>1</sup>) *Proc. Roy. Soc.*, t. LXXX, p. 207; t. LXXXI, 1908, p. 464; t. LXXXV, 1911, p. 25.

est disposé dans le trou inférieur. Au-dessus de B se trouve un autre plateau C maintenu à un potentiel  $V'$  de même signe que  $V$ , celui de B, mais tel que  $V'$  soit plus grand que  $V$ ; A et B seront reliés à un électromètre.

Le gaz entre B et C est ionisé par des rayons de Röntgen; suivant que le potentiel de C est positif ou négatif, les ions négatifs ou positifs seront entraînés vers la toile métallique; comme la direction de la force électrique est la même au-dessus et au-dessous de la toile, des ions passeront à travers cette dernière, et se dirigeront vers le disque D. Mais dans leur trajet vers E, un certain nombre d'ions diffuseront latéralement et atteindront, non plus E, mais le plateau A. Plus le champ entre B et A sera intense, moins la diffusion se produira, et plus grande sera la proportion d'ions qui atteindront le disque E. Soit  $R$  le rapport du nombre d'ions recueilli par E au nombre total atteignant A et E.

50. La distribution des ions entre A et B peut s'obtenir facilement en fonction de la pression partielle développée par les ions. Soit  $n$  le nombre d'ions par centimètre cube,  $u$  leur vitesse,  $Z$  la force électrique suivant l'axe des  $x$ , les équations correspondant aux trois axes rectangulaires sont de la forme

$$\frac{pu}{D} = - \frac{dp}{dx} + nZe, \quad \dots$$

Différentiant et remplaçant dans l'équation de continuité, on obtient

$$(1) \quad \frac{d^2p}{dx^2} + \frac{d^2p}{dy^2} + \frac{d^2p}{dz^2} = Ze \frac{dn}{dz} = Z \frac{Ne}{P} \frac{dp}{dz}.$$

$N$  est le nombre de molécules par centimètre cube à la pression atmosphérique  $P$ , et à la température à laquelle l'expérience est faite. Il est facile d'avoir une solution de l'équation satisfaisant à toutes les conditions de sur-

face; en développant  $p$  en séries de fonctions de Bessel, l'équation se réduira à la forme

$$(2) \quad \frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} + \frac{d^2 p}{dz^2} = \frac{NeZ}{P} \frac{dp}{dz},$$

$r$  étant la distance d'un point à l'axe; la distribution est symétrique autour de l'axe des  $z$ , joignant le centre de la toile métallique au centre du disque. Cette équation montre que  $p = f(NeZ)$  en un point quelconque; on peut la résoudre facilement, et le rapport  $R$  de la charge  $n_1$  reçue par le disque, à la charge totale  $n_1 + n_2$  peut être trouvé en fonction de  $NeZ$

$$(3) \quad R = \Phi(NeZ).$$

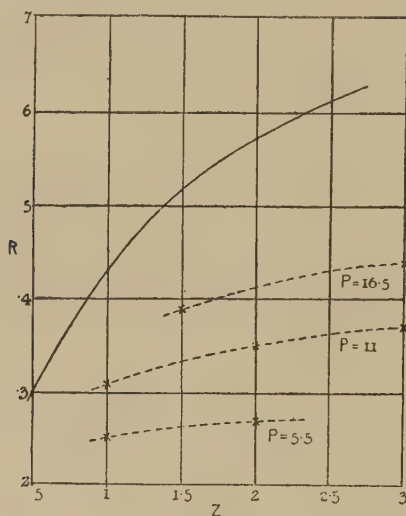


Fig. 13.

Posons

$$p = q e^{-\theta^2 z},$$

l'équation devient

$$\frac{d^2 q}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dq}{dr} = \left( -\theta^2 \frac{NeZ}{P} - \theta^4 \right) q = \lambda^2 q,$$

d'où

$$q = J_0(\lambda r)$$

et

$$p = \Sigma \mu J_0(\lambda r) e^{-\theta^2 z},$$

$\mu$  et  $\lambda$  étant déterminés par les conditions à la surface,  $\theta^2$  est la racine carrée de l'équation

$$(4) \quad \theta^4 + \frac{\theta^2 NeZ}{P} = \lambda^2;$$

$p$  peut ainsi être trouvé en un point de la plaque inférieure où  $z = h$ , et l'on en déduit  $R$ .

La relation entre  $R$  et  $NeZ$  est très compliquée; on trace une courbe en fonction de  $NeZ$ , d'où il sera facile de déduire  $NeZ$ , pour une valeur de  $R$  donnée par l'expérience. La courbe (*fig. 13*) représente la relation entre  $R$  et  $Z$  pour  $N = 1,225 \cdot 10^{-10}$ .

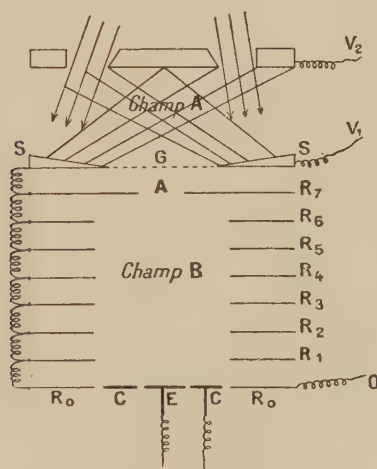


Fig. 14.

51. La figure 14 représente l'appareil employé, les rayons de Röntgen primaires  $P$  entrent dans l'appareil à travers une fenêtre d'aluminium percée dans le

couvercle de laiton de l'appareil, ils traversent un diaphragme annulaire, et tombent sur la plaque S (*fig. 14*). Une partie des ions mis en liberté par les rayons secondaires passent à travers la toile métallique sous l'influence de la force électrique, puis à travers le trou A dans le champ inférieur. Le courant d'ions diffuse latéralement, la partie centrale tombe sur le disque E, le reste sur l'anneau C. Entre A et R<sub>0</sub> sont une série d'anneaux métalliques équidistants les uns des autres, et reliés en série par des grandes résistances; lorsque S est au potentiel V et R<sub>0</sub> au sol, il y a ainsi un champ parfaitement uniforme dans l'espace situé au-dessous de la toile métallique G. C et E ont été coupés dans la même feuille de laiton pour éviter les différences de potentiel de contact.

52. Pour que la méthode puisse être appliquée, il faut : 1° que le rapport R soit indépendant de la pression du gaz dans l'appareil; 2° qu'il varie avec  $z$  conformément à l'équation (3); ces conditions sont réalisées, sauf dans le cas des ions négatifs, quand le gaz est très sec. Si l'appareil contient un desséchant, on observe après une dessiccation de 3 ou 4 jours, que R diminue pour les ions négatifs avec les champs les plus intenses et les pressions les plus faibles. Les trois courbes pointillées (*fig. 13*) représentent les valeurs de R obtenues après dessiccation de plusieurs semaines, pour les pressions de 16<sup>mm</sup>, 3, 11<sup>mm</sup> et 5<sup>mm</sup>, 5. Si l'on met en communication avec une ampoule contenant de l'eau, et que l'on introduise une faible quantité de vapeur d'eau dans l'appareil, les rapports R reprennent leurs valeurs primitives données par la courbe théorique, et sont indépendants de la pression. Une quantité de vapeur d'eau n'exerçant qu'une pression partielle de  $\frac{1}{10}$  de millimètre suffit.

Sans faire intervenir, ce qui semble absurde, une variation de la charge avec la dessiccation, remarquons que

Townsend a montré que l'ion négatif, mis en liberté par les rayons ultraviolets, est plus petit que l'ion positif, que par suite son libre parcours est plus considérable, mais l'effet est vraisemblablement dû en partie à l'inégalité des masses.

33. Sous l'action de la force électrique, la vitesse de translation des ions augmente, et quand les collisions avec les molécules ont lieu, les ions ne perdent pas en général toute l'énergie acquise, mais, après plusieurs collisions, continuent à se mouvoir dans toutes les directions avec un accroissement d'énergie. La pression partielle exercée par les ions est par suite supérieure à celle d'un nombre égal de molécules environnantes pendant que la force agit; mais la différence n'est appréciable qu'en présence d'un champ électrique, et quand la pression du gaz est faible. Dans ce cas la pression  $p$  due aux ions est

$$(5) \quad p = K \frac{P}{N} n,$$

et l'équation (1) devient

$$(6) \quad \Delta^2 p = \frac{Ne}{P} \frac{Z}{K} \frac{dp}{dz},$$

où  $K$  est plus grand que l'unité, augmentant avec la force électrique, et diminuant avec un accroissement de la pression du gaz; en effet, une augmentation dans le nombre des collisions avec les molécules diminue le libre parcours et tend à égaliser l'énergie de translation des ions et des molécules.  $K$  représente le rapport de la pression partielle des ions à celle d'un nombre égal de molécules du gaz environnant et

$$R = f\left(Ne \frac{Z}{K}\right),$$

$K$  dépend évidemment de  $Z$  et de  $l$  ou  $\frac{Z}{P}$ ,  $l$  étant le libre

parcours;  $K$  est inversement proportionnel à  $P$ , de sorte que  $K$  est fonction de  $\frac{Z}{P}$ , les diverses valeurs de  $K$  correspondant aux différentes forces et pressions peuvent être trouvées par l'expérience.

54. Si  $R$  est le rapport correspondant à la force  $Z$  pour les gaz secs, la force  $Z_1$  qui donnerait le même rapport quand  $K = 1$ , peut se déduire de la courbe, de telle sorte que  $K_1 = \frac{Z}{Z_1}$  est facilement déterminé. Le Tableau suivant indique les valeurs de  $K$  pour différentes forces  $Z$  et pressions  $P$  :

|                     |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Z$ .....           | 1     | 1,5   | 1     | 2     | 3     | 1,5   | 3     |
| $P$ .....           | 11,0  | 16,5  | 5,5   | 11    | 16,5  | 5,5   | 11    |
| $K$ .....           | 1,85  | 1,83  | 2,86  | 2,90  | 2,85  | 3,75  | 4,00  |
| $\frac{Z}{P}$ ..... | 0,091 | 0,091 | 0,182 | 0,182 | 0,182 | 0,273 | 0,273 |

Ainsi donc  $K$  ne change pas quand  $Z$  et  $P$  sont modifiés dans la même proportion. Ces expériences montrent que même à basse pression, la vapeur d'eau tend à se condenser sur les ions négatifs.

55. Si l'on veut comparer les charges portées par les deux ions, il n'est pas nécessaire de connaître la forme de la fonction  $\Phi$ . Les expériences exécutées avec les rayons de Röntgen ont montré que, pour la même intensité du champ, les valeurs de  $K$  pour les ions positifs étaient beaucoup plus grandes que pour les négatifs; mais quand le champ a une valeur double, on obtient pour les ions négatifs la même valeur que pour les ions positifs, à 1 pour 100 près. Il en résulte

$$\Phi(Ne_+Z) = \Phi(Ne_-2Z)$$

pour toutes les valeurs de  $Z$ .

En valeur absolue

$$Ne_+ = 2,41.10^{10},$$

$$Ne_- = 1,23.10^{10}.$$

56. Les valeurs tirées des mesures de diffusion de Townsend (*voir* première Partie) montrent que  $Ne_+$  est plus grand que  $Ne_-$ , toutefois ces nombres ne justifieraient pas la conclusion d'une charge double; en effet, une première recombinaison a pu avoir déjà lieu entre l'ion positif et un ion négatif; de sorte qu'après un certain temps, une grande proportion d'ions positifs ne portera que la moitié de leur charge positive.

57. Mais ce qui semble surprenant, ce sont les circonstances dans lesquelles prennent naissance ces ions à charge double. Townsend après ses premières expériences, ayant démonté son appareil, nettoya l'anneau S qui était très terni; dans ces conditions il trouve les valeurs suivantes :

$$Ne_+ = 1,26.10^{10},$$

$$Ne_- = 1,24.10^{10}.$$

La méthode la plus simple pour avoir des ions à charge double consiste à recouvrir de vaseline la surface sur laquelle prennent naissance les rayons secondaires; la vaseline absorbe les rayons secondaires non pénétrants, et une petite couche jouit de la propriété de réduire l'ionisation. Les ions à charge double seraient donc ceux qui seraient produits par les rayons pénétrants.

58. Un troisième Mémoire contient les expériences exécutées avec l'oxygène, l'hydrogène, l'acide carbonique, en même temps qu'un nombre considérable de recherches entreprises pour étudier l'influence de la dessiccation complète sur le mouvement des ions négatifs.

Pour Ne, Townsend a trouvé avec différentes pressions, intensités de radiation, grandeurs du champ :

*Ions négatifs.*

|                       |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| Oxygène.....          | Ne = 1,23. 10 <sup>10</sup> |
| Hydrogène.....        | Ne = 1,24. 10 <sup>10</sup> |
| Acide carbonique..... | Ne = 1,23. 10 <sup>10</sup> |

*Ions positifs.*

|                       |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| Oxygène.....          | Ne = 1,24. 10 <sup>10</sup> |
| Hydrogène.....        | Ne = 1,26. 10 <sup>10</sup> |
| Acide carbonique..... | Ne = 1,32. 10 <sup>10</sup> |

Si la couche sur laquelle les rayons secondaires prennent naissance est recouverte de vaseline, on obtient :

|                       |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| Oxygène.....          | Ne = 1,71. 10 <sup>10</sup> |
| Hydrogène.....        | Ne = 1,84. 10 <sup>10</sup> |
| Acide carbonique..... | Ne = 1,55. 10 <sup>10</sup> |

59. Comme l'a indiqué déjà Townsend, il faut, pour que les lois de la diffusion s'appliquent, dans le cas des ions négatifs, une trace de vapeur d'eau, 10<sup>mm</sup> de pression pour l'oxygène, 30<sup>mm</sup> pour l'hydrogène. C'est ainsi que dans l'oxygène, avec un champ de 2 volts par centimètre,  $R = 0,465$  à 10<sup>mm</sup> de pression, et 0,277 à 5<sup>mm</sup>, tandis que, s'il y a un peu de vapeur d'eau présente,  $R = 0,57$  dans les deux cas. Dans les gaz secs on peut expliquer le mouvement des ions négatifs par l'hypothèse qu'ils ont la forme corpusculaire quand  $\frac{Z}{P}$  est suffisamment grand; la vitesse relativement considérable de translation, dans des directions normales à la force électrique, serait due à un accroissement de la vitesse d'agitation, plus grande que la valeur moyenne que prendraient les ions s'ils étaient en équilibre avec les molécules du gaz. On peut tirer des expériences, le rapport existant entre les pressions partielles des ions et celles d'un nombre égal de molécules

en équilibre thermique avec le gaz. Quand  $Z = 1$  volt par centimètre, et  $P = 10^{\text{mm}}$ , la pression partielle des ions est le double de celle d'un nombre égal de molécules, et la vitesse d'agitation  $\sqrt{2}$  fois plus grande.

60. Sous l'action de la force  $Z$ , la vitesse prise par les ions est

$$\frac{1}{D}(pu) = nZe,$$

$D$  étant le coefficient de diffusion des ions lorsque le champ agit.

Quand  $\frac{Z}{P}$  est petit la pression partielle est reliée au nombre d'ions par centimètre cube,  $n$ , par

$$\frac{p}{n} = \frac{P}{N},$$

$N$  étant le nombre de molécules à  $760^{\text{mm}}$  et  $16^{\circ}$ . Quand  $Z = 0,9$  volt par centimètre et  $P = 10^{\text{mm}}$ ,  $p$  est 1,85 fois plus grand, de sorte que l'on a

$$D = \frac{1,85 \times Pu}{NeZ} = 93$$

avec

$$U = 1845; \quad Z = \frac{0,9}{300}; \quad Ne = 1,22 \cdot 10^{10}.$$

Dans l'air, des particules d'égale masse se déplaceraient  $\sqrt{1,85}$  fois moins vite. Pour  $\text{CO}_2$  diffusant dans l'air, le coefficient de diffusion est 1,42, la somme des pressions étant  $760^{\text{mm}}$ , de sorte qu'à  $10^{\text{cm}}$  le coefficient d'interdiffusion serait 10,8. Les coefficients d'interdiffusion de deux gaz sont proportionnels à  $\sqrt{m_1 m_2}$ ,  $m_1$  et  $m_2$  étant les masses des molécules des deux gaz; en conséquence le rapport de la masse de l'ion  $M$  à la masse  $m$  de la molécule de  $\text{CO}_2$  est  $\frac{(108)^2}{(71)^2} = \frac{1}{43}$ . Quand  $\frac{Z}{P} = 0,09$ ,

la valeur moyenne  $M$  est donc plus petite que la masse d'une molécule d'air, ce qui montre que pendant un certain temps l'électron est sans cortège. Quand  $\frac{P}{Z}$  augmente,  $M$  devient de plus en plus petit, mais les vitesses n'ont pas été déterminées avec suffisamment de certitude pour des valeurs plus élevées. Pour que les équations de la diffusion s'appliquent, il faut que la vitesse de l'ion dans la direction de la force électrique soit petite, comparée à la vitesse d'agitation, et c'est bien le cas.

#### TRAVAUX DE HASELFOOT.

61. Ces expériences demandaient à être reprises avec une autre source d'ionisation que les rayons de Röntgen; un élève de Townsend, Haselfoot les recommença en rendant les gaz conducteurs par les rayons du radium. Ce corps était contenu à l'intérieur des rainures pratiquées dans un anneau de laiton peu large, une feuille d'aluminium les recouvrait, et l'anneau était placé sur  $S$  (fig. 14). Haselfoot a été gêné par l'émanation qui s'échappait à travers les joints fixant l'aluminium sur l'anneau de laiton; en retournant l'appareil, l'effet de la radioactivité induite se fait peu sentir dans le champ  $B$ . On peut aussi faire passer un courant d'air de  $B$  à  $A$  à travers l'ouverture, et il est possible de rendre faible le nombre d'ions formés dans le champ  $B$ . D'autre part, il faut avoir soin que le champ soit suffisamment intense, et la pression suffisamment faible, pour que la répulsion mutuelle des ions soit négligeable.

62. Des mesures ont été faites aux pressions de  $4^{\text{mm}},5$ ,  $9^{\text{mm}}$  et  $1^{\text{mm}},45$ , avec des champs de 1, 2, et 4 volts par centimètre pour les deux ions.

Dans le cas des ions négatifs, trois mesures effectuées avec un champ de 2 volts par centimètre ont donné

$Ne = 1,26 \cdot 10^{10}$ , et 5 mesures avec un champ de 4 volts par centimètre  $Ne = 1,37 \cdot 10^{10}$ . Pour le cas des ions négatifs, trois mesures avec un champ de 2 volts par centimètre ont donné  $Ne = 1,24 \cdot 10^{10}$ . Pour les mesures effectuées avec un champ de 1 volt, la correction de répulsion mutuelle est très forte; elle peut atteindre 20 pour 100 dans quelques cas. Les résultats les plus précis s'obtiennent à des pressions de  $4^{cm}$  à  $6^{cm}$ , et avec des champs de 1 à 2 volts par centimètre.

Haselfoot a reconnu qu'il était plus facile d'expérimenter avec les ions négatifs : En renversant l'appareil, c'est-à-dire en plaçant le champ B en haut, la radio-activité induite reste confinée dans le champ A. Mais dans les mesures effectuées avec les ions positifs, quand le disque et l'anneau forment l'électrode négative, la force électrique tend à ramener l'émanation dans le champ B. La correction pour l'ionisation qui se produit en B est par suite sujette à des variations.

63. En résumé, de l'ensemble de ces recherches, il semble bien résulter qu'il y a formation d'ions porteurs de charges doubles, seulement dans le cas où l'ionisation est produite par les rayons secondaires des rayons de Röntgen, et cela quand la surface d'émission est ternie.

#### RECHERCHES DE MILLIKAN.

64. Les expériences précédentes sont en contradiction absolue, avec celles que Millikan a effectuées par une méthode toute différente.

Il introduit dans un condensateur à plateaux horizontaux, par un trou très fin, une goutte provenant de la pulvérisation d'un liquide; cette goutte est généralement chargée. On mesure sa vitesse de chute, et pendant

cette chute on superpose un champ électrique au champ terrestre, de façon que la goutte remonte dans le condensateur. La vitesse prise par la goutte est alors mesurée à nouveau; on supprime le champ, on le rétablit et ainsi de suite. L'air est alors ionisé par des rayons de Röntgen; des ions viennent diffuser sur la goutte et la charge de celle-ci augmente ou diminue; la vitesse prise sous l'action du champ électrique se trouve donc modifiée. Millikan calcule alors la charge  $E_1$  portée par la goutte avant l'ionisation, et  $E_2$  après. Le plus grand commun diviseur de  $E_1$  et de  $E_2$  donne la charge de l'électron.

65. Mais quand une goutte capte simultanément deux ou trois ions séparés, il est difficile de décider si une variation semblable vient de la rencontre simultanée de la goutte avec plusieurs ions simples, ou avec un ion à charge multiple. Dans le cas de gouttes aussi petites que possible, il est évident que les chances de rencontrer plusieurs ions à la fois deviennent moins grandes; en conséquence, si la fréquence des variations multiples de charge diminue en même temps que les dimensions de la goutte, il y aura là un argument sérieux contre l'existence des ions plurivalents. Millikan fait d'ailleurs observer que, dans un champ de 1000 à 6000 volts par centimètre, la proportion des fixations de charges simples ou doubles sur les gouttes doit être indépendante de la dimension de celles-là; tandis qu'elle doit décroître comme le carré du rayon, si les charges doubles qui viennent se fixer sur la goutte sont dues à la capture simultanée de deux ions séparés.

66. Le plateau supérieur du condensateur était chargé négativement, et le champ réglé de façon que la goutte restât dans son voisinage; on faisait alors agir un instant

---

(<sup>1</sup>) Voir ROUX, *Thèse*, 1913.

(<sup>2</sup>) MILLIKAN, *Phil. Mag.*, juin 1911, p. 753.

les rayons X. Les ions positifs se dirigeaient vers le plateau supérieur, et l'un d'eux se fixait sur la goutte; on excitait alors de nouveau le tube producteur de rayons X, et cela jusqu'à ce que la goutte eût fixé trois ou quatre ions. Le champ était alors coupé, la goutte déchargée de l'extérieur avec un tube de radium, et l'on recommençait. L'intervalle entre deux rencontres n'était plus que de quelques secondes; dans un temps relativement court, il était possible d'observer jusqu'à 100 rencontres avec la même goutte. Les déplacements de la goutte étaient mesurés à l'aide d'une lunette portant un oculaire muni d'une échelle graduée.

Il était indispensable de se retrouver dans des conditions expérimentales identiques à celles de Townsend, et d'ioniser par suite le gaz à l'aide de rayons secondaires émis par une surface métallique polie ou non. Dans ce cas, il suffisait de faire arriver les rayons sur une des armatures du condensateur, que l'on pouvait recouvrir d'une couche d'huile.

67. Voici un des Tableaux du Mémoire de Millikan;  $g$  est la vitesse de chute sous l'influence de la pesanteur seule,  $F$  est la vitesse d'ascension mesurée par le temps nécessaire pour que la goutte parcoure 10 divisions de l'échelle de l'oculaire.  $P$  indique les ions positifs,  $N$  les négatifs.

Distance des plateaux : 1<sup>cm</sup>,6. Différence de potentiel : 1015 voltsDistance de chute : 0<sup>cm</sup>,975.Température : 23° C. Rayon de la goutte. 6<sup>cm</sup>,3.10<sup>-5</sup>.

| Nombre<br>de charges |       |                   |          | Nombre<br>de charges |      |                   |          |
|----------------------|-------|-------------------|----------|----------------------|------|-------------------|----------|
| g.                   | F.    | portées<br>par la |          | g.                   | F.   | portées<br>par la |          |
|                      |       | goutte.           | captées. |                      |      | goutte.           | captées. |
| 19....               | 100   | 1 P               |          | 20....               | 10   | 1 N               |          |
|                      | 16    | 2 P               | 1 P      |                      | 20   | 0                 | 1 P      |
|                      | 8     | 3 P               | 1 P      |                      | 100  | 1 P               | 1 N      |
| 20....               | 16    | 2 P               |          |                      | 20   | 0                 | 1 P      |
|                      | 8     | 3 P               | 1 P      |                      | 100  | 1 P               | 1 P      |
|                      |       |                   |          |                      | 16   | 2 P               | 1 P      |
|                      | 100   | 1 P               |          |                      | 8    | 3 P               | 1 P      |
|                      | 17    | 2 P               | 1 P      |                      |      |                   |          |
|                      | 8,2   | 3 P               | 1 P      |                      | 104  | 1 P               |          |
|                      | 6     | 4 P               |          |                      | 15   | 2 P               | 1 P      |
|                      |       |                   |          |                      | 9    | 3 P               | 1 P      |
|                      | 7     | 2 N               | 1 P      |                      | 6    | 4 P               |          |
|                      | 9,8   | 1 N               | 1 N      |                      |      |                   |          |
|                      | 7     | 2 N               |          |                      |      |                   |          |
| 21....               | 20    | 0                 |          | 20....               | 6,5  | 2 P               |          |
|                      | 95    | 1 P               | 1 P      |                      | 10   | 1 P               | 1 P      |
|                      | 16,5  | 2 P               | 1 P      |                      | 20   | 0 P               | 1 P      |
|                      | 8     | 3 P               | 1 P      |                      | 100  | 1 P               | 1 P      |
|                      | 6     | 4 P               | 1 P      |                      | 16,5 | 2 P               | 1 P      |
|                      |       |                   |          |                      | 8    | 3 P               | 1 P      |
|                      | 100   | 1 P               |          |                      | 6    | 4 P               | 1 P      |
|                      | 16    | 2 P               | 1 P      |                      |      |                   |          |
| 20....               | 8,4   | 3 P               |          | 20....               | 100  | 1 P               | 1 P      |
|                      |       |                   |          |                      | 16,5 | 2 P               |          |
|                      |       |                   |          |                      |      |                   |          |
| 20....               | 100,5 | 1 P               |          | 20....               | 20   | 0                 | 1 P      |
|                      | 16    | 2 P               | 1 P      |                      | 100  | 1 P               | 1 P      |
|                      | 8,4   | 3 P               | 1 P      |                      | 15,6 | 2 P               | 1 P      |
| 20....               | 10    | 1 N               |          |                      | 8,8  | 3 P               | 1 P      |
|                      | 20    | 0                 | 1 P      |                      | 5,7  | 4 P               |          |
|                      | 100   | 1 P               | 1 P      |                      |      |                   |          |
|                      | 16    | 2 P               |          |                      | 100  | 1 P               | 1 N      |
|                      |       |                   |          |                      | 20   | 0                 | 1 N      |
|                      | 100   | 1 P               | 1 P      |                      | 10   | 1 N               | 1 P      |
|                      | 16    | 2 P               | 1 P      |                      | 20   | 0                 |          |
|                      | 8     | 3 P               |          |                      |      |                   |          |

68. La conclusion de Millikan est la suivante : le processus d'ionisation des molécules, aussi bien par les rayons de Röntgen primaires et secondaires de dureté variable, que par les rayons  $\beta$  et  $\gamma$ , consiste uniformément, dans toutes les conditions où il a opéré, en la mise en liberté d'une seule charge élémentaire de la molécule.

69. Aux conclusions de Millikan, Townsend <sup>(1)</sup> répond par les considérations suivantes : Pour conclure de façon certaine, il faudrait savoir, pour l'ensemble d'ions recueillis, quelle proportion d'entre eux on peut s'attendre à voir porter des charges doubles; s'il n'y en a que 9 ou 10 pour 100, ces derniers pourront-ils venir adhérer comme les autres à la gouttelette? Il est infiniment probable que le cortège de molécules groupées autour de l'ion à charge double sera plus considérable que pour les autres ions; si d'autre part, comme Franck et Westphal l'ont trouvé, le coefficient de diffusion est moitié de celui des ions à charge simple, leur vitesse d'agitation est proportionnellement petite, de sorte qu'avant d'arriver au contact de l'électrode ils auront parcouru un chemin moitié de celui des autres. Dans ces conditions un ion quelconque à charge double aura moins de chance qu'un ion à charge simple de rencontrer un corps présent dans le gaz. Les expériences ont montré de plus que les ions négatifs étaient captés plus facilement par la gouttelette que les positifs; il ne s'ensuit pas pour cela qu'il y a plus d'ions négatifs que de positifs présents dans le gaz.

70. Je me permettrai néanmoins de faire observer que, si la proportion d'ions à charge double est si faible, il est curieux de voir que l'on trouve pour  $\text{Ne}$ , dans le cas des ions positifs, une valeur sensiblement double de celle que l'on obtient pour les ions négatifs.

---

(1) TOWNSEND, *Phil Mag.*, juillet 1911, p. 240.

Il était intéressant de faire d'autres expériences sur cette question. M. Langevin m'a proposé d'étudier expérimentalement une méthode qu'il avait imaginée dans ce but.

## CHAPITRE II.

### Méthode de M. Langevin pour la mesure de $\frac{k}{D}$ .

71. Dans la méthode de Townsend, les mesures portent sur une seule catégorie d'ions, qu'un champ auxiliaire extrait de la région où le rayonnement les produit en même temps que ceux de signe contraire. Dans celle de M. Langevin <sup>(1)</sup>, on opère directement sur le gaz ionisé là où les rayons agissent, et l'on fait intervenir les ions des deux signes.

La couche gazeuse se trouve comprise entre deux plateaux métalliques très rapprochés, que traverse un rayonnement ionisant normal à leur surface; soit  $a$  leur distance; grâce à la proximité des plateaux, on peut supposer la production uniforme, à la condition que les rayons secondaires émis par le métal, aient un parcours de l'ordre de l'épaisseur de la couche gazeuse. Dans ces conditions, en l'absence de différence de potentiel entre les plateaux, il s'établira un régime permanent où la production se trouvera équilibrée d'une part par la diffusion et de l'autre par la recombinaison. L'effet de la recombinaison peut être considéré comme négligeable vis-à-vis de celui de la diffusion, dans le cas d'armatures très rapprochées; le régime permanent se trouve régi par la relation

$$D \frac{d^2 p}{dx^2} = -q,$$

où  $D$  représente le coefficient de diffusion des ions positifs et  $q$  la *production*, c'est-à-dire la quantité d'électricité produite par l'ensemble des ions par unité de volume,

<sup>(1)</sup> Radium, 1913, Avril, p. 113.

$p$  la charge totale des ions positifs contenus dans l'unité de volume à la distance  $x$  de l'un des plateaux;  $p$  doit être nul pour  $x = a$  ou  $x = 0$ ; en intégrant il vient pour la distribution des ions

$$(1) \quad p = \frac{q}{2D} x(a - x).$$

De même pour les ions négatifs

$$(2) \quad n = \frac{q}{2D} x(a - x).$$

La densité des ions dans l'intervalle des plateaux varie de façon parabolique, maximum au milieu, décroissant également de part et d'autre; sa valeur en chaque point est inversement proportionnelle au coefficient de diffusion.

S'il existe une différence de potentiel, il se produit un nouveau régime permanent, dans lequel le maximum de densité des ions positifs se trouve déplacé dans le sens du champ, celui des ions négatifs en sens inverse; il y a passage d'un courant. Pour les champs faibles altérant peu la distribution parabolique des ions, la part du courant revenant à chaque catégorie d'ions sera proportionnelle au produit de leur mobilité par leur densité. Celle-ci, en première approximation, est inversement proportionnelle au coefficient de diffusion  $D$ , car les ions disparaissent surtout par diffusion. Le courant total sera donc proportionnel à  $\left(\frac{k}{D} + \frac{k'}{D}\right) V$ ,  $V$  étant la différence de potentiel;  $k$  et  $k'$  les mobilités respectives des ions positifs et négatifs. Pour une différence de potentiel quelconque, l'expression du courant fait intervenir en première approximation les quotients  $\frac{k}{D}$  et  $\frac{k'}{D}$ .

La méthode consistera donc, pour déterminer ces quotients et par suite la valence des ions, à produire l'ionisation d'un gaz compris entre deux plateaux métal-

liques parallèles très rapprochés, et à suivre expérimentalement les variations du courant avec la différence de potentiel établie entre les plateaux.  $V$  devra être connu en valeur absolue; le courant  $i$  sera mesuré en valeur relative. Le rapport  $\frac{i}{I}$ ,  $I$  étant le courant de saturation, permettra de calculer  $\frac{k}{D}$  à l'aide des formules qui vont être établies.

La distance entre les plateaux et leur surface interviennent seulement dans les termes correctifs; ces derniers ont une double origine, la première correspond à la recombinaison, la seconde à la déformation du champ produit par les charges des ions.

72. Les équations générales du mouvement des ions sont les suivantes :

$$(3) \quad \frac{d}{dx} \left( D \frac{dp}{dx} - kh p \right) = \alpha p n - q,$$

$$(4) \quad \frac{d}{dx} \left( D \frac{dn}{dx} - kh n \right) = \alpha p n - q,$$

$$(5) \quad \frac{dh}{dx} = \frac{4\pi}{K} (p - n);$$

$K$  étant le pouvoir inducteur spécifique du gaz, et  $h$  le champ électrique.

$p$  et  $n$  doivent s'annuler pour  $x = a$  et  $x = 0$ , et l'on doit avoir

$$\int_0^a h \, dx = V.$$

M. Langevin a développé les expressions de  $p$ ,  $n$ ,  $h$ , et  $i$  suivant les puissances croissantes de  $q$ , les termes de la série obtenue pour  $i$  correspondent aux approximations successives dont on a besoin.

Les quantités d'électricité traversant par unité de temps l'unité de surface d'un plan parallèle aux plateaux

sont respectivement pour les deux catégories d'ions :

$$khp - D \frac{dp}{dx}, \quad k'hn - D' \frac{dn}{dx}.$$

Le courant par unité de surface étant indépendant de  $x$ , il suffit de le calculer pour  $x = 0$ , c'est-à-dire pour la surface du plateau positif. Les quantités d'électricité positive et négative que reçoit par unité de temps l'unité de surface du plateau sont, puisque  $p$  et  $n$  sont égaux à 0 pour  $x = 0$ ,

$$C = D \left( \frac{dp}{dn} \right)_0, \quad C' = D' \left( \frac{dn}{dx} \right)_0,$$

et l'on a

$$i = S(C' - C),$$

$S$  désignant la surface du plateau.

Mettons les développements en série sous la forme

$$p = p_1 q + p_2 q^2 + \dots + p_r q^r + \dots,$$

$$n = n_1 q + n_2 q^2 + \dots + n_r q^r + \dots,$$

$$h = h_0 + h_1 q + h_2 q^2 + \dots,$$

$$C = C_1 q + C_2 q^2 + \dots,$$

$$C' = C'_1 q + C'_2 q^2 + \dots,$$

$p_1, p_2, \dots, n_1, n_2, \dots, h_1, h_2$  sont des fonctions de  $x$  satisfaisant à des équations différentielles, qu'il est facile d'établir en substituant les développements en série dans les équations générales, et en égalant de part et d'autre les coefficients d'une même puissance de  $q$ .

Si l'on conserve seulement les termes du premier degré en  $q$ , les équations deviennent

$$(6) \quad \frac{d}{dx} \left( k h_0 p_1 - D \frac{dp_1}{dx} \right) = 1,$$

$$(7) \quad \frac{d}{dx} \left( k' h_0 n_1 + D' \frac{dn_1}{dx} \right) = -1,$$

$$(8) \quad \frac{dh_1}{dx} = \frac{4\pi}{K} (p_1 - n_1).$$

73. *Première approximation.* — En première approximation il n'est pas utile, pour la connaissance de  $i$ , d'obtenir explicitement les expressions de  $p_1$  et de  $n_1$ ; l'intégration par rapport à  $x$  de ces deux équations donne, si l'on tient compte que  $p_1$  et  $n_1$  sont nuls pour  $x = 0$ ,

$$(9) \quad k h_0 p_1 - D \frac{dp_1}{dx} = -C_1 + x,$$

$$(10) \quad k' h_0 n_1 + D \frac{dn_1}{dx} = C'_1 - x.$$

Posons

$$p_1 = A_1 e^{\frac{k h_0 x}{D}}.$$

$A_1$  doit s'annuler comme  $p_1$  pour  $x = 0$  et  $x = a$ .

$$D \frac{dA_1}{dx} = (C_1 - x) e^{-\frac{k h_0 x}{D}}.$$

Posons

$$m = \frac{k h_0 a}{D} = \frac{k}{D} V$$

et intégrons en tenant compte des conditions aux limites

$$(11) \quad C_1 = a \left( \frac{1}{m} - \frac{e^{-m}}{1 - e^{-m}} \right),$$

$$(12) \quad C'_1 = a \left( \frac{e^{m'}}{e^{m'} - 1} - \frac{1}{m'} \right).$$

En première approximation, le courant  $i$  est donné par

$$i = q S (C'_1 - C_1),$$

d'où, à ce degré d'approximation,

$$(13) \quad \frac{i}{I} = \frac{e^{m'}}{e^{m'} - 1} + \frac{e^{-m}}{1 - e^{-m}} - \frac{1}{m'} - \frac{1}{m}.$$

Cette relation peut se simplifier.

En effet supposons  $V$  petit,  $m$  et  $m'$  sont petits; il vient

$$\frac{i}{I} = \frac{1}{12} (\bar{m} + \bar{m}') = \frac{V}{12} \left( \frac{k}{D} + \frac{k'}{D'} \right),$$

le courant est proportionnel à  $V$ .

Supposons maintenant  $V$  suffisamment élevé pour que  $m$  et  $m'$  soient grands.

$$\frac{i}{I} = 1 - \frac{1}{m} - \frac{1}{m'},$$

$$\frac{1-i}{I} = \frac{1}{V} \left( \frac{D}{k} + \frac{D'}{k'} \right).$$

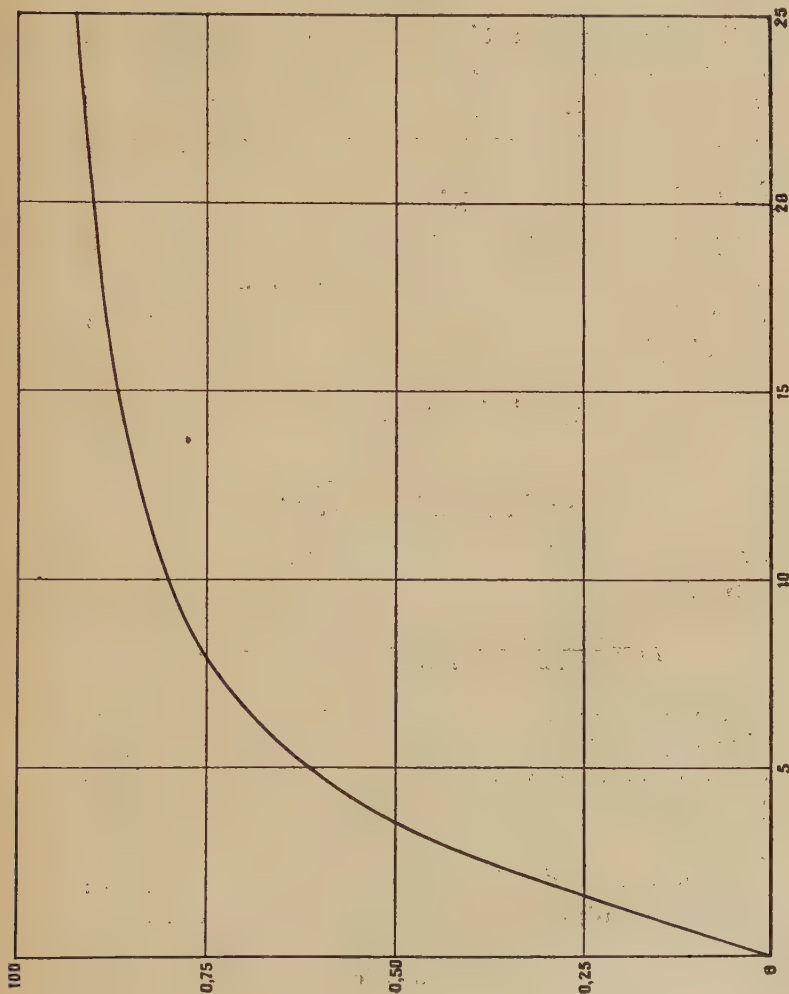


Fig. 15.

On peut exprimer ce résultat en disant que le *manque de saturation* est inversement proportionnel à  $V$ .

Si les ions ont même valence,  $m = m'$ , la formule devient

$$(14) \quad \frac{i}{I} = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} - \frac{2}{m}.$$

Cette loi est représentée par la courbe de la figure 15, où l'on porte en abscisses  $m$ , et en ordonnées les fractions de saturation  $\frac{i}{I}$ . Les différents points expérimentaux doivent, par l'intermédiaire de la formule (14), conduire à une même valeur de  $\frac{k}{D}$ .

74. Pour atteindre la deuxième approximation, il nous faut connaître les valeurs de  $p_1$ ,  $n_1$ ,  $h_1$  en fonction de  $x$ . Pour cela introduisons dans (9) la valeur de  $C_1$  trouvée plus haut; nous trouvons

$$A_1 = \frac{1}{D} \int_0^x (C_1 - x) e^{\frac{-kh_0}{a}} dx,$$

$$p_1 = \frac{a^2}{Dm} \left( \frac{x}{a} - \frac{e^{\frac{mx}{a}} - 1}{e^m - 1} \right),$$

avec une expression analogue pour  $n_1$ .

Si  $V$  est petit,

$$p_1 = \frac{x(a-x)}{2D} - \frac{kh_0}{12D^2} x(a-x)(a-2x).$$

Quand le champ est nul, cette formule donne bien le régime permanent de diffusion; elle montre de plus comment un champ électrique déplace dans sa direction le maximum de densité des ions dans l'intervalle des plateaux.

Quant à  $h_1$  on l'obtient facilement à partir de  $p_1$  et  $n_1$  en intégrant (8) et en tenant compte de la condition

$$\int_0^a h_1 dx = 0.$$

75. *Deuxième approximation.* —  $p_2$  et  $sn_2$  sont déterminés par les équations

$$D \frac{dp_2}{dx} - k h_0 p_2 = C_2 + k h_1 p_1 + \alpha \int_0^x p_1 n_1 dx = C_2 + X_2,$$

$$D' \frac{dn_2}{dx} - k' h_0 n_2 = C'_2 - k' h_1 n_1 + \alpha \int_0^x p_1 n_1 dx = C'_2 + X_2,$$

$X_2$  et  $X'_2$  sont des fonctions connues de  $x$  données par la solution précédente.

Comme dans le calcul de la première approximation, on détermine  $C_2$  et  $C'_2$  en tenant compte des conditions aux limites pour  $p_2$  et  $n_2$ , d'où

$$C_2 \int_0^a e^{-\frac{kh_0 x}{D}} dx = - \int_0^a X_2 e^{-\frac{kh_0 x}{D}} dx,$$

$$C_2 = \frac{m}{\alpha(e^m - 1)} \int_0^a X_2 e^{-\frac{m x}{a}} dx,$$

$$C'_2 = \frac{m'}{\alpha(1 - e^{m'})} \int_0^a X'_2 e^{-\frac{m' x}{a}} dx.$$

Le courant comporte comme terme correctif de seconde approximation la quantité

$$q^2 S(C'_2 - C_2).$$

Cette expression comprend donc comme  $X_2$  et  $X'_2$  une partie proportionnelle à  $\alpha$  et traduisant l'influence de la recombinaison, et une autre provenant des termes en  $h_1$  correspondant à la déformation du champ.

De cette façon, si les ions ont même valence, et si la différence de potentiel est faible, il vient

$$\frac{i}{I} = \frac{kV}{6D} \left[ 1 - \frac{\alpha^2 q}{560} \frac{4\pi(k+k')}{KDD'} (1 + 11\varepsilon) \right],$$

où  $\varepsilon$  <sup>(1)</sup> représente

$$\frac{K\alpha}{4\pi(k+k')}.$$

---

(1) Ions, électrons, corpuscules, t I, p. 310.

Les deux termes de la parenthèse  $(1 + 11\varepsilon)$  correspondent aux deux corrections de déformations du champ et de recombinaison; elles sont toutes deux de même forme et dans le rapport 11:1. Dans le cas de l'air normal,  $\varepsilon = 0,27$ ; l'effet de la recombinaison pour les faibles voltages est triple de celui de la déformation du champ; ces deux effets tendent à diminuer l'intensité du courant mesuré et par suite la valeur de  $\frac{k}{D}$ .

Au voisinage de la saturation, un calcul analogue donne

$$\frac{1-i}{I} = \frac{2}{K} \frac{D}{V} \left[ 1 + \frac{\pi I a^3}{3SV} \left( \frac{r}{D} + \frac{1}{D'} \right) \left( \varepsilon + \frac{1}{m} \right) \right].$$

En l'absence de corrections, on est donc conduit à des valeurs de  $\frac{k}{D}$  d'autant plus petites, que l'on aura utilisé pour les calculs des courants plus éloignés de la saturation.

Il est inutile de calculer les termes d'ordre supérieur au second.

#### RECHERCHES EXPÉRIMENTALES <sup>(1)</sup>.

76. L'appareil se compose d'un condensateur à anneau de garde dont les armatures ont été coupées dans la même planche d'aluminium. L'armature B (*fig. 16*) est fixée sur un bloc de plomb C, dont la partie supérieure plus large, vient reposer sur l'anneau de garde D par l'intermédiaire des cales de quartz F. Une boîte de laiton E vient recouvrir l'anneau de garde, formant protection électrostatique. Pour éliminer toute fuite due à l'ionisation du gaz dans l'intérieur de la boîte E, celle-ci est remplie de paraffine, et le bloc C et les cales de quartz sont noyées dans cet isolant. Le bloc de plomb a pour

(<sup>1</sup>) E. SALLES. *Le Radium*, 1913, p. 119.

but de couper le rayonnement en arrière de l'armature B. L'ensemble repose sur le plateau A par l'intermédiaire des cales de quartz G.

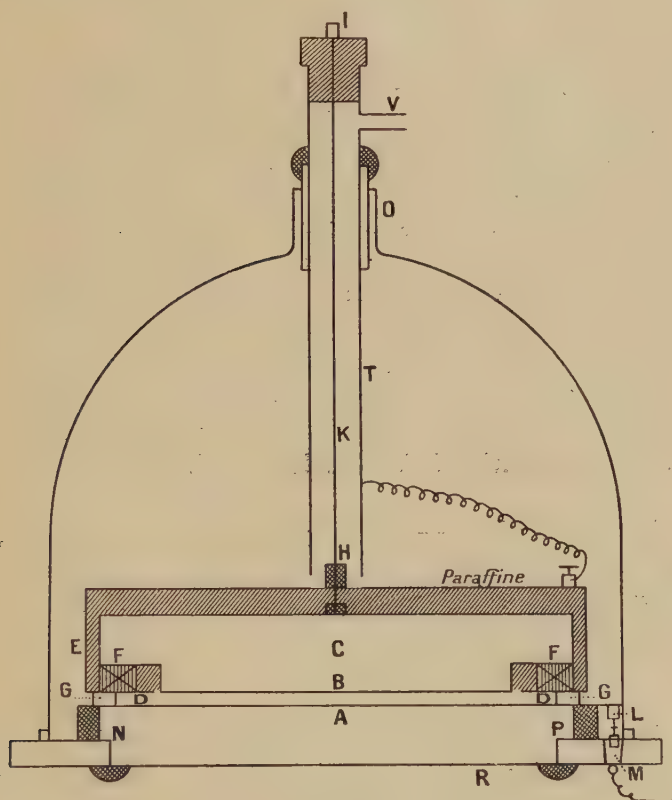


Fig. 16.

L'appareil est placé sous une cloche dans laquelle on peut faire le vide par l'ajutage V soudé dans le tube T, mastiqué dans le rodage O; T sert en outre de protection électrostatique au conducteur K reliant B à la borne I. A l'aide du fil M fixé à la borne L du plateau A, on porte ce dernier au potentiel voulu. Le plan de verre sur lequel

repose la cloche est percé d'une ouverture circulaire NP sur laquelle est mastiquée une lame d'aluminium R. Le radium ( $7^{\text{mg}}$  environ) est disposé au-dessous de R, de façon que le rayonnement dans la couche d'air BA puisse être considéré comme uniforme.

77. *Compensateur.* — Sur la tige T d'un cathétomètre (*fig. 19*) est fixée une planche N percée d'une ouverture O; sur cette planche et au-dessus de O, se trouve une chambre d'ionisation A dont l'armature extérieure est en communication avec la pile P<sub>3</sub>. Le gaz contenu par A est ionisé par un échantillon de sel de baryum radifère renfermé dans le tube métallique K; ce tube est maintenu dans une tige de bois J disposée dans le porte-lunette du cathétomètre. En déplaçant le chariot L', on diminuera ou on augmentera l'ionisation, suivant que le déplacement aura lieu en montant ou en descendant; les petits déplacements sont exécutés à l'aide de la vis V.

78. *Graduation.* — Pour graduer le compensateur, j'emploie une méthode de mesure de courant due à Townsend, sous la forme que lui a donnée M. Lattès; elle constitue une véritable méthode de zéro analogue à celle du quartz piézo-électrique.

79. J'ai indiqué (n° 37) la méthode de mesure imaginée par M. Moulin; dans celle de M. Lattès on établit progressivement la différence de potentiel V entre les armatures du condensateur, et cela tout en maintenant le spot au zéro pour que la compensation soit continue. On réalise très facilement cette condition en utilisant un rhéostat à variation continue de Gaiffe. Soit A (*fig. 17*) le condensateur de mesure, C le condensateur auxiliaire, R le rhéostat traversé par le courant de la pile P. Les pointillés indiquent les connections du rhéostat monté en

réducteur de potentiel. On soulève la clef de mise au sol K, le spot se déplace sur l'échelle; quand le spot passe par une division déterminée d'avance, on met en

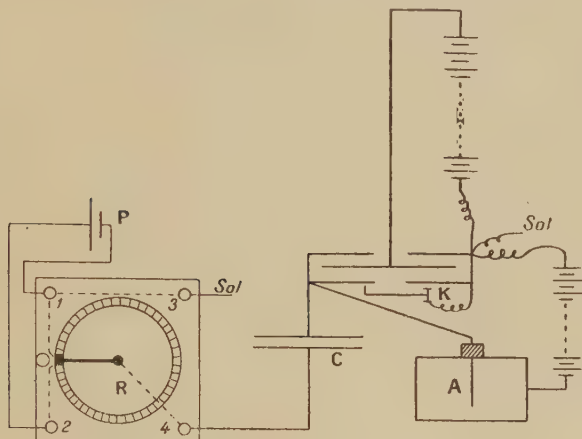


Fig. 17.

marche un chronomètre, puis on tourne la manivelle du rhéostat de façon à ramener le spot au zéro et à l'y maintenir. On continue ce mouvement jusqu'à ce que le rhéostat arrive à fin de course; à ce moment le spot repart et on arrête le chronomètre quand le spot repasse par la division déterminée.

Soient  $T$  la durée de l'expérience,  $C$  la capacité,  $V$  la différence de potentiel aux bornes de la pile; cette différence de potentiel étant exprimée en volts, on obtient pour le courant  $i$  l'expression

$$i = \frac{CV}{T \times 300}.$$

La précision de la mesure atteint facilement 2 pour 100

Le rhéostat avait une résistance de 1200 ohms; la force électromotrice de la pile, était comparée après chaque opération à celle d'un élément Weston.

La figure 18 est la reproduction de la courbe d'étalonnage du compensateur, les courants étant portés en

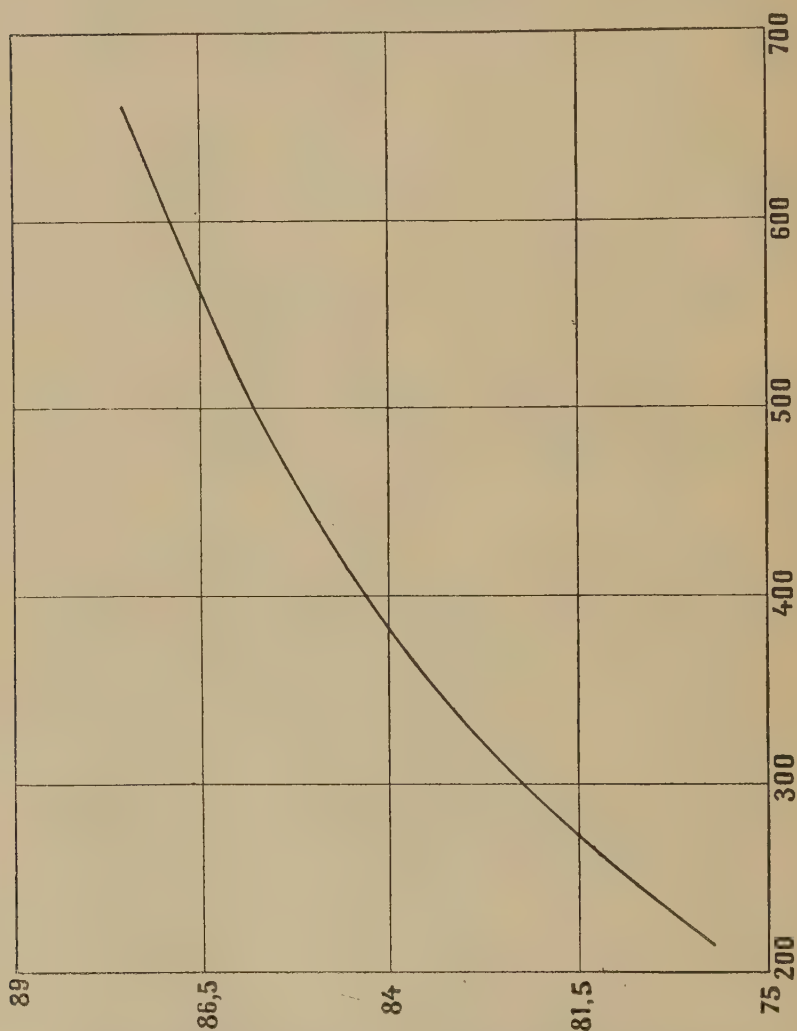


Fig. 18.

abscisses et les divisions du compensateur en ordonnées.  
Les courants sont exprimés en unités arbitraires.

80. *Montage général.* — La figure 19 donne une vue du montage général. Le condensateur de recherches placé sous la cloche D est relié au condensateur auxiliaire; ce dernier est connecté à l'électromètre F, et à l'électrode de la chambre d'ionisation A du compensateur. Toutes

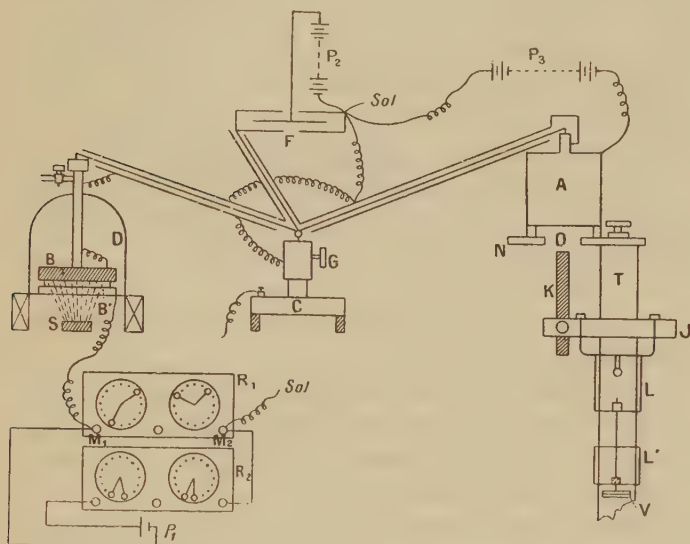


Fig. 19.

les connections sont faites par des fils protégés électrostatiquement et noyés dans la paraffine. Le condensateur C est muni d'un dispositif de mise au sol commandé par la vis G. La chambre d'ionisation A est portée à 90 volts environ à l'aide d'une batterie d'accumulateurs  $P_3$ , dont l'autre pôle est mis au sol; la batterie  $P_2$  sert à charger l'aiguille de l'électromètre.

Pour porter le plateau inférieur du condensateur de recherches au potentiel voulu, j'ai employé un potentiomètre formé de deux boîtes de résistance  $R_1$  et  $R_2$ , sur laquelle on fait débiter un Daniell P; on vérifie la force

électromotrice de cet élément par comparaison à celle d'un Weston. La borne  $M_1$  est en communication par exemple avec le plateau inférieur  $B'$  du condensateur de recherches, et  $M_2$  est mise au sol.

La source radioactive ( $7^{\text{mg}}$  de sel de radium pur) est disposée en S; on intercale un écran de plomb de  $4^{\text{cm}}$  d'épaisseur, entre la matière active et l'électromètre distant environ de  $1^{\text{m}}$ ; d'autres blocs de plomb sont également disposés de façon à couper le rayonnement, qui pourrait se propager dans la direction de la chambre d'ionisation A. Comme néanmoins il pouvait y avoir des rayons diffusés par le mur, la cloche D en étant peu distante, on a placé contre l'électromètre une feuille de plomb de  $0^{\text{cm}},5$  d'épaisseur.

81. *Expériences.* — Les expériences peuvent être exécutées de deux façons :

a. On produit un champ donné entre les armatures du condensateur de recherches, et l'on équilibre le courant en approchant ou éloignant la matière active de la chambre d'ionisation A.

b. C'est la méthode inverse : le compensateur étant fixé dans une position bien déterminée, on cherche quel champ il faut établir entre les armatures du condensateur de recherches, pour que l'électromètre reste au zéro.

82. *Première méthode.* — Bien que les armatures d'aluminium du condensateur de recherches aient été coupées dans la même planche de métal, il existait néanmoins entre elles une différence de potentiel venant s'ajouter ou se retrancher à la différence de potentiel appliquée. Il en résultait un décalage de la couche de saturation. Il est indispensable, pour ces mesures, de ne jamais toucher aux armatures, sans quoi la différence de potentiel varie, et l'état d'équilibre peut être très long à atteindre.

Voici un exemple de la marche suivie : J'ai employé cette méthode surtout dans mes premières expériences. Je mettais 10 000 ohms sur  $R_2$  et  $R_1$  ; la borne  $M_1$  étant reliée au pôle positif de la pile, et la chambre d'ionisation A étant en communication avec le pôle négatif de la batterie  $P_3$ , je réglais le compensateur de façon que l'aiguille de l'électromètre reste au zéro. Il faut naturellement laisser l'électromètre isolé pendant un temps plus ou moins long ; la position d'équilibre s'obtient facilement en tâtonnant. Je cherchais les positions du compensateur entre lesquelles le spot se déplace soit vers la droite soit vers la gauche en s'aidant de la vis V. Puis je faisais varier les résistances sur  $R_1$ , en laissant 10 000 ohms sur  $R_2$ . Voici l'ordre des résistances introduites :

| $R_2$ .  | $R_1$ .  | $R_2$ .  | $R_1$ .  |
|----------|----------|----------|----------|
| $\omega$ | $\omega$ | $\omega$ | $\omega$ |
| 10 000   | 10 000   | 10 000   | 5 000    |
| »        | 8 000    | »        | 4 000    |
| »        | 6 000    |          |          |

A ce moment, la différence de potentiel de contact, m'empêchait d'aller plus loin. Inversant le sens du champ sur le condensateur, et maintenant le champ du compensateur, je continuais ainsi :

| $R_2$ .  | $R_1$ .  | $R_2$ .  | $R_1$ .  |
|----------|----------|----------|----------|
| $\omega$ | $\omega$ | $\omega$ | $\omega$ |
| 10 000   | 900      | 10 000   | 300      |
| »        | 600      | »        | 400      |

Je déterminais ensuite la valeur du courant quand l'armature inférieure du condensateur était portée au potentiel zéro ; puis j'inversais le sens du champ sur le compensateur.

| $R_2$ .  | $R_1$ .  | $R_2$ .  | $R_1$ .  |
|----------|----------|----------|----------|
| $\omega$ | $\omega$ | $\omega$ | $\omega$ |
| 10 000   | 300      | 10 000   | 2 000    |
| »        | 600      | »        | 4 000    |
| »        | 900      | »        | 10 000   |

Il n'y avait plus qu'à mesurer le courant de saturation.

Dans les premières expériences j'ai déterminé la valeur

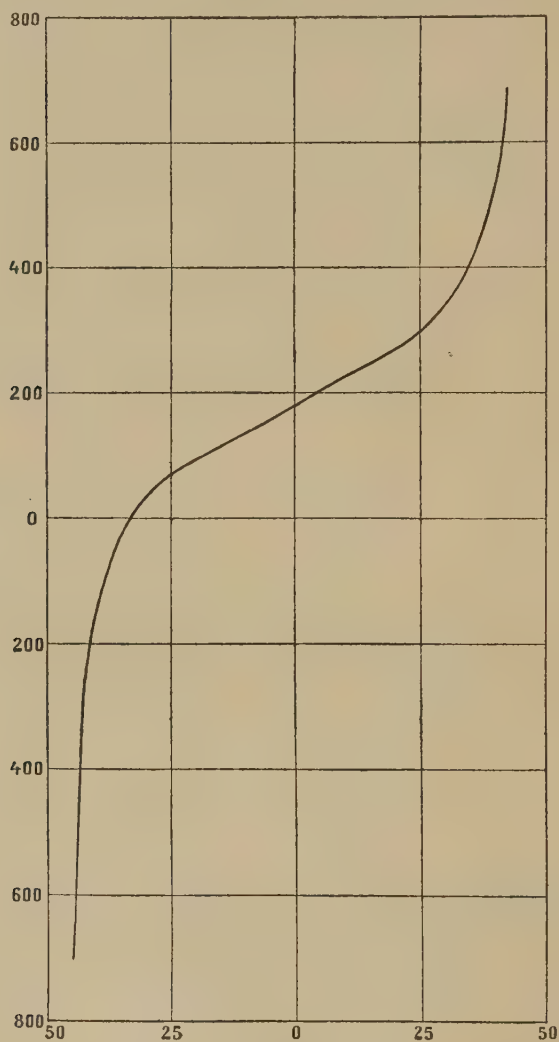


Fig. 20.

du courant pour le champ fourni par un, deux ou plusieurs éléments Leclanché, mais on se trouve de suite dans la

partie rectiligne de la courbe de saturation. Les

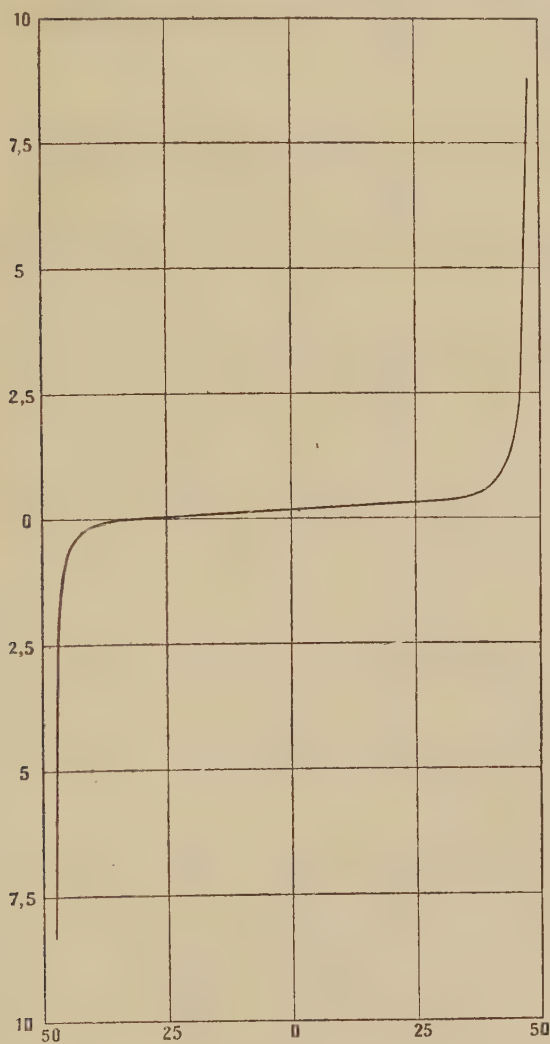


Fig. 21.

figures 20 et 21 reproduisent les courbes que l'on construit facilement, connaissant par l'étalonnage du compensateur,

la valeur du courant pour les diverses positions et le champ par un simple calcul de résistance, la force électromotrice de la pile étant connue.

83. Il est bien évident que ces mesures sont seulement possibles si le zéro de l'électromètre ne bouge pas; il faut au cours de ces expériences, se mettre à l'abri des courants de convection qui se produisent dans la cage de l'électromètre, sous l'influence des variations de température.

Au cours de mes recherches, je me suis toujours servi d'un électromètre Curie; les organes de cet instrument se trouvent renfermés dans une cage métallique volumineuse, et les variations de température produisent des courants de convection. Bien que placé à une distance notable de l'électromètre, le radiateur de la pièce où je travaillais exerçait sur l'électromètre une action sensible, le zéro se déplaçait à vue d'œil dans un sens, puis en sens inverse quand le chauffage baissait. J'ai essayé d'entourer l'appareil d'une enveloppe de feutre analogue à celle des calorimètres, mais sans grand succès, vraisemblablement à cause du défaut de protection du haut et du bas de l'appareil. J'ai donc été obligé de ne travailler qu'à des moments où le chauffage ne produisait pas de perturbations.

84. *Deuxième méthode.* — On opère exactement en sens inverse; on met 10 000 ohms sur  $R_2$ , puis, plaçant la source radioactive du compensateur à différentes positions repérées sur le tige du cathédomètre, on cherche quelle résistance il faut établir sur  $R_1$  pour que la différence de potentiel soit telle qu'il y ait équilibre entre les deux courants. Par exemple :

| Divisions<br>du compensateur. | R <sub>1</sub> (ions +). | R <sub>1</sub> (ions —). | R <sub>2</sub> . |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| 86                            | 5500                     | »                        | 10000            |
| 85,9                          | »                        | 10000                    | »                |
| 85,5                          | 2400                     | 6800                     | »                |
| 85                            | 1540                     | 4800                     | »                |
| 84,5                          | 1120                     | 4000                     | »                |
| 84                            | 745                      | 3500                     | »                |
| 83,5                          | 500                      | 3150                     | »                |
| 83                            | 320                      | 2880                     | »                |

85. Après les inévitables tâtonnements destinés à la mise en œuvre d'une nouvelle méthode, j'ai obtenu assez rapidement des résultats satisfaisants.

Je donne ici les valeurs de  $\frac{k}{D}$  déduites d'un certain nombre de points tirés des courbes données figures 20 et 22 (1).

AIR :  $\alpha = 0^{\text{cm}}, 27$  (fig. 20).

$$\text{Partie rectiligne (2)} : \frac{i}{I} = \frac{m}{6} \left[ 1 - \frac{\alpha^3 I (k + k')}{35 R^2 D D'} \right].$$

| I.      | i.      | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|---------|----------------------|
| 0,00471 | 0,0025  | 0,99.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00789 | 0,99.10 <sup>4</sup> |

$$\text{Voisinage de la saturation} : \frac{I-i}{I} = \frac{2}{m}.$$

| I.      | i.      | $\frac{k}{D}$ .      | Correction. |
|---------|---------|----------------------|-------------|
| 0,00471 | 0,0039  | 1,20.10 <sup>4</sup> | 0,026       |
| »       | 0,0035  | 1,17.10 <sup>4</sup> | 0,038       |
| »       | 0,00375 | 1,18.10 <sup>4</sup> | 0,031       |

(1) Ces courbes ont été construites en portant en abscisses les courants, et en ordonnées les différences de potentiel existant entre les deux armatures du condensateur, les unités étant arbitraires.

(2) La formule du n° 75 est

$$\frac{i}{I} = \frac{kV}{6D} \left[ 1 - \frac{\alpha^4 q}{360} \frac{4\pi (k + k')}{k D D'} \right] (1 + 11\varepsilon).$$

Remarquons que  $q \frac{\alpha}{S}$  est le courant de saturation I, en appelant S la surface de l'électrode, d'autre part  $\varepsilon = 0,37$  pour l'air normal; en effectuant les calculs, il vient

$$\frac{i}{I} = \frac{kV}{6D} \left[ 1 - \frac{\pi I \alpha^3 (k + k')}{35 R^2 D D'} \right]$$

R étant le rayon de l'électrode

$$\text{Formule générale : } \frac{i}{I} = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} - \frac{2}{m}.$$

| I.      | i.      | m.   | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|---------|------|----------------------|
| 0,00471 | 0,0040  | 13,1 | 1,17.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00375 | 9,4  | 1,08.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,0035  | 7,7  | 1,10.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00325 | 6,4  | 1,06.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,0030  | 5,4  | 1,05.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00275 | 4,6  | 1,05.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,0025  | 3,9  | 1,02.10 <sup>4</sup> |

AIR :  $a = 0^{\text{cm}}, 27$  (fig. 22).

$$\text{Partie rectiligne : } \frac{i}{I} = \frac{m}{6} \left[ 1 - \frac{\alpha^3 I (k + k')}{35 R^2 D_1 D_2} \right].$$

| I.      | i.      | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|---------|----------------------|
| 0,00471 | 0,00190 | 0,99.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00227 | 0,99.10 <sup>4</sup> |

$$\text{Voisinage de la saturation : } \frac{I-i}{I} = \frac{2}{m}.$$

| I.      | i.      | $\frac{k}{D}$ .      | Correction. |
|---------|---------|----------------------|-------------|
| 0,00471 | 0,00376 | 1,20.10 <sup>4</sup> | 0,03        |
| »       | 0,00375 | 1,21.10 <sup>4</sup> | 0,03        |
| »       | 0,00335 | 1,15.10 <sup>4</sup> | 0,04        |

$$\text{Formule générale : } \frac{i}{I} = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} - \frac{2}{m}.$$

| I.      | i.      | m.  | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|---------|-----|----------------------|
| 0,00471 | 0,00375 | 9,8 | 1,17.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,0035  | 7,7 | 1,13.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,0030  | 5,4 | 1,09.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,0028  | 4,7 | 1,06.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,0025  | 3,9 | 1,04.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00225 | 3,4 | 1,02.10 <sup>4</sup> |

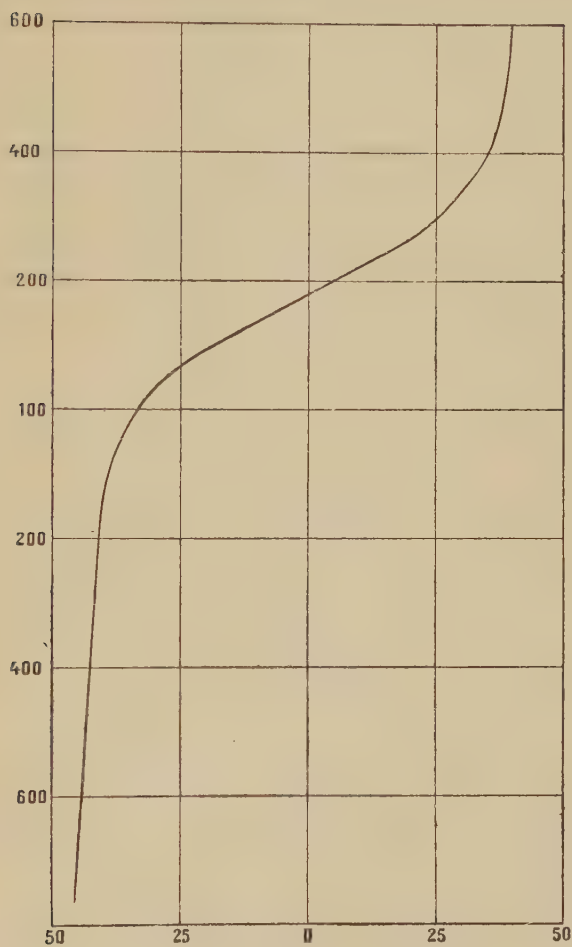


Fig. 22.

AIR :  $a = 0^{\text{cm}}, 24$  (fig. 23).

$$\frac{i}{I} = \frac{m}{6} \left[ 1 - \frac{I a^3 (k + k')}{35 R^2 D D'} \right].$$

| I.     | $i$ .  | $\frac{k}{D}$ . |
|--------|--------|-----------------|
| 0,0070 | 0,0050 | $1 \cdot 10^4$  |
| »      | 0,0040 | $1 \cdot 10^4$  |
| »      | 0,0030 | $1 \cdot 10^4$  |
| »      | 0,0020 | $1 \cdot 10^4$  |

$$\frac{I-i}{I} = \frac{2}{m}.$$

| I.     | i.      | $\frac{k}{D}$     | Correction. |
|--------|---------|-------------------|-------------|
| 0,0070 | 0,0062  | $1,23 \cdot 10^4$ | 0,019       |
| »      | 0,00575 | $1,23 \cdot 10^4$ | 0,03        |
| »      | 0,00520 | $1,22 \cdot 10^4$ | 0,043       |
| »      | 0,00473 | $1,15 \cdot 10^4$ | 0,051       |

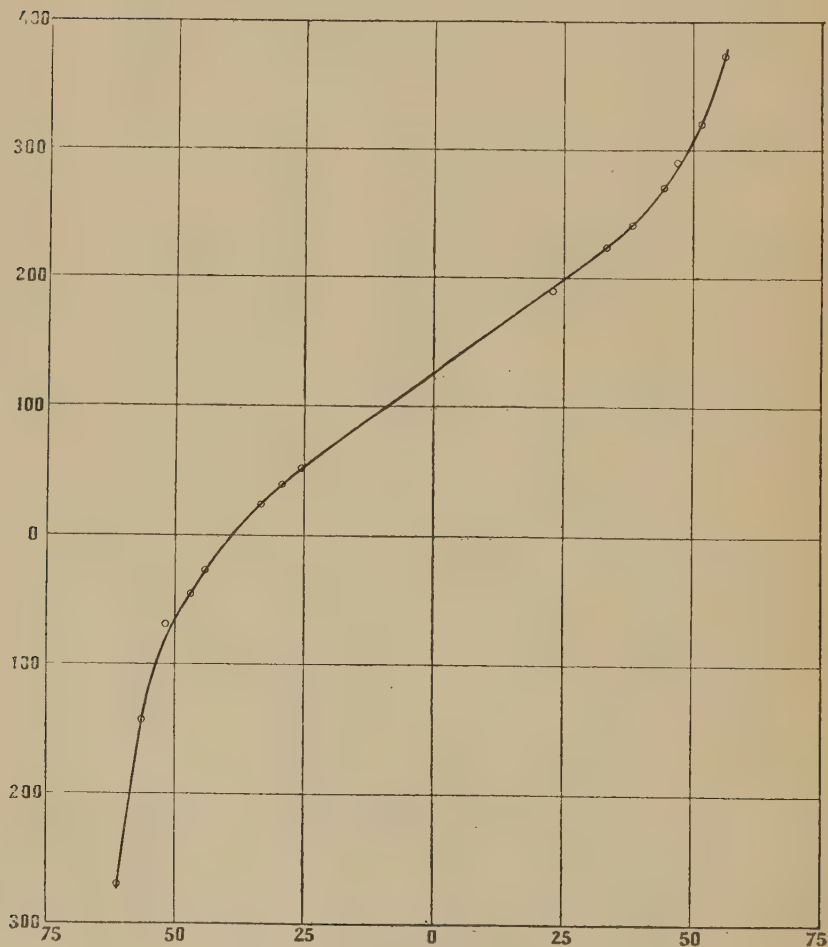


Fig. 23.

$$\frac{i}{\bar{I}} = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} - \frac{2}{m},$$

| I.     | <i>i.</i> | <i>m.</i> | $\frac{k}{\bar{D}}$  |
|--------|-----------|-----------|----------------------|
| 0,0070 | 0,00620   | 17,4      | 1,20.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00575   | 11,1      | 1,19.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00566   | 10,0      | 1,17.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00520   | 7,7       | 1,16.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00473   | 6,2       | 1,11.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00445   | 5,4       | 1,08.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00390   | 4,2       | 1,03.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00330   | 3,4       | 1,02.10 <sup>4</sup> |
| »      | 0,00200   | 1,8       | 0,94.10 <sup>4</sup> |

AIR :  $\alpha = 0^{\text{cm}}, 3$  (*fig.* 24).

$$\frac{i}{\bar{I}} = \frac{m}{6} \left[ 1 - \frac{1 a^3 (k + k')}{36 R^2 D_1 D_2} \right].$$

| I.      | <i>i.</i> | $\frac{k}{\bar{D}}$  |
|---------|-----------|----------------------|
| 0,00772 | 0,004     | 1,20.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,003     | 1,18.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,002     | 1,18.10 <sup>4</sup> |

$$\frac{i}{\bar{I}} = \frac{2}{m}.$$

| I.      | <i>i.</i> | $\frac{k}{\bar{D}}$  | Correction. |
|---------|-----------|----------------------|-------------|
| 0,00772 | 0,00664   | 1,14.10 <sup>4</sup> | 0,045       |
| »       | 0,00645   | 1,14.10 <sup>4</sup> | 0,055       |
| »       | 0,00611   | 1,13.10 <sup>4</sup> | 0,067       |
| »       | 0,00514   | 1,12.10 <sup>4</sup> | 0,10        |

$$\frac{i}{\bar{I}} = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} - \frac{2}{m}.$$

| I.      | <i>i.</i> | <i>m.</i> | $\frac{k}{\bar{D}}$  |
|---------|-----------|-----------|----------------------|
| 0,00772 | 0,00664   | 14,3      | 1,07.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00645   | 12        | 1,07.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00611   | 9,6       | 1,07.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00563   | 7,3       | 1,00.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00514   | 5,7       | 1,00.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00439   | 4,4       | 1,00.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00379   | 3,6       | 1,00.10 <sup>4</sup> |

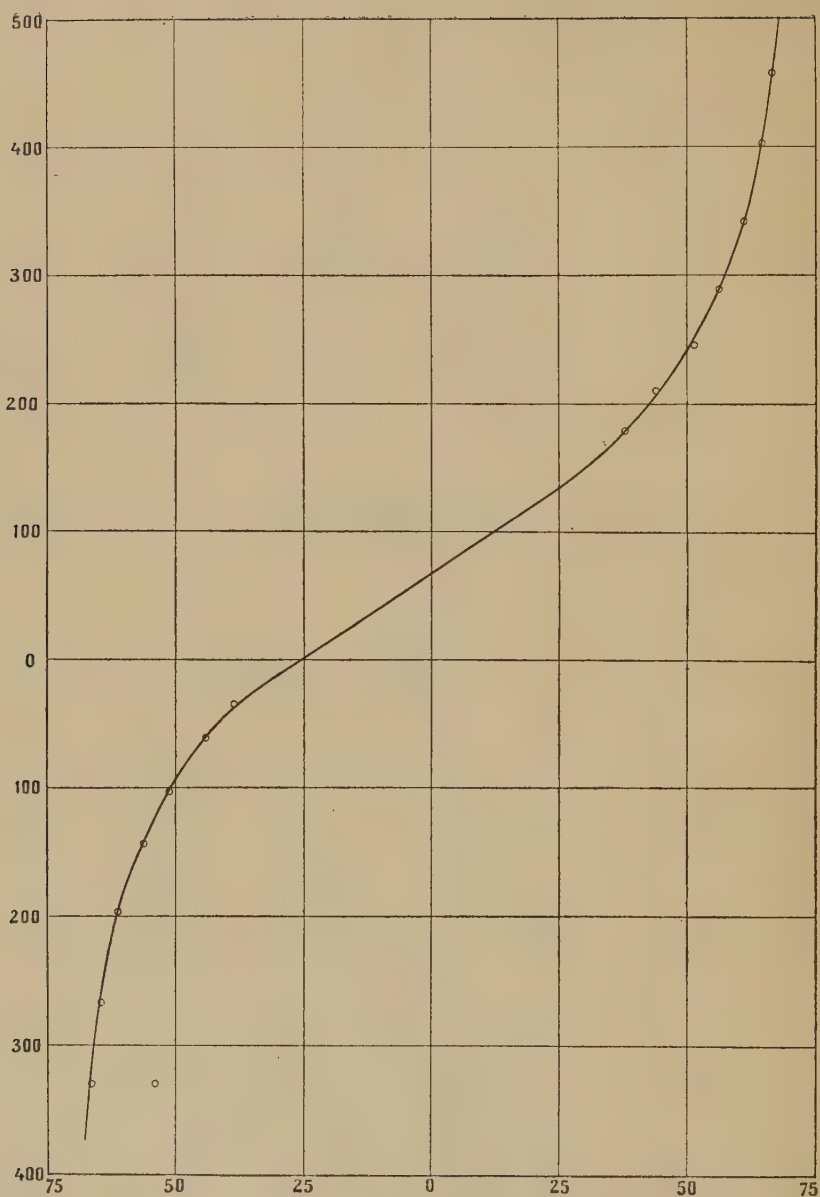


Fig. 24.

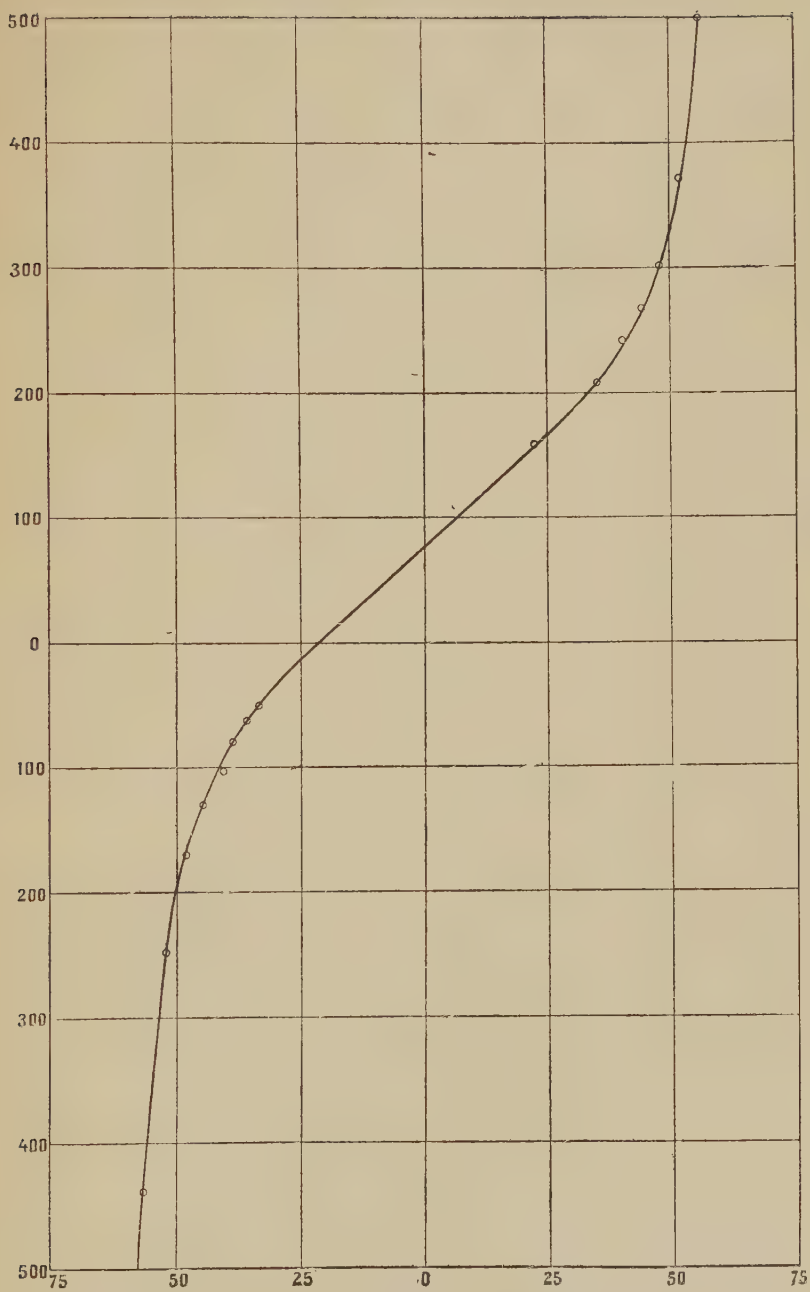


Fig. 25.

$$\text{AIR} : \alpha = 0^{\text{cm}}, 3 \text{ (fig. 25)}.$$

$$\frac{i}{I} = \frac{m}{6} \left[ 1 - \frac{I \alpha^3 (k + k')}{35 R^2 D_1 D_2} \right].$$

| I.      | i.     | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|--------|----------------------|
| 0,00627 | 0,0030 | 1,02.10 <sup>4</sup> |

$$\frac{I - i}{I} = \frac{2}{m}.$$

| I.      | i.     | $\frac{k}{D}$ . | Correction. |
|---------|--------|-----------------|-------------|
| 0,00627 | 0,0055 | 1,20            | 0,036       |
| »       | 0,0052 | 1,20            | 0,018       |
| »       | 0,0049 | 1,16            | 0,062       |

$$\frac{i}{I} = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} - \frac{2}{m}.$$

| I.      | i.      | m.   | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|---------|------|----------------------|
| 0,00627 | 0,0055  | 16,2 | 1,17.10 <sup>4</sup> |
|         | 0,0052  | 14,5 | 1,11.10 <sup>4</sup> |
|         | 0,0048  | 8,4  | 1,07.10 <sup>4</sup> |
|         | 0,00445 | 6,8  | 1,04.10 <sup>4</sup> |
|         | 0,00405 | 5,55 | 1,00.10 <sup>4</sup> |
|         | 0,00385 | 5,0  | 1,08.10 <sup>4</sup> |
|         | 0,00355 | 4,4  | 0,93.10 <sup>4</sup> |

$$\text{AIR} : \alpha = 0^{\text{cm}}, 3 \text{ (fig. 26)}.$$

$$\frac{i}{I} = \frac{m}{6} \left[ 1 - \frac{\alpha^3 I (k + k')}{35 R^2 D_1 D'} \right].$$

| I.      | i.     | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|--------|----------------------|
| 0,00572 | 0,0020 | 0,96.10 <sup>4</sup> |

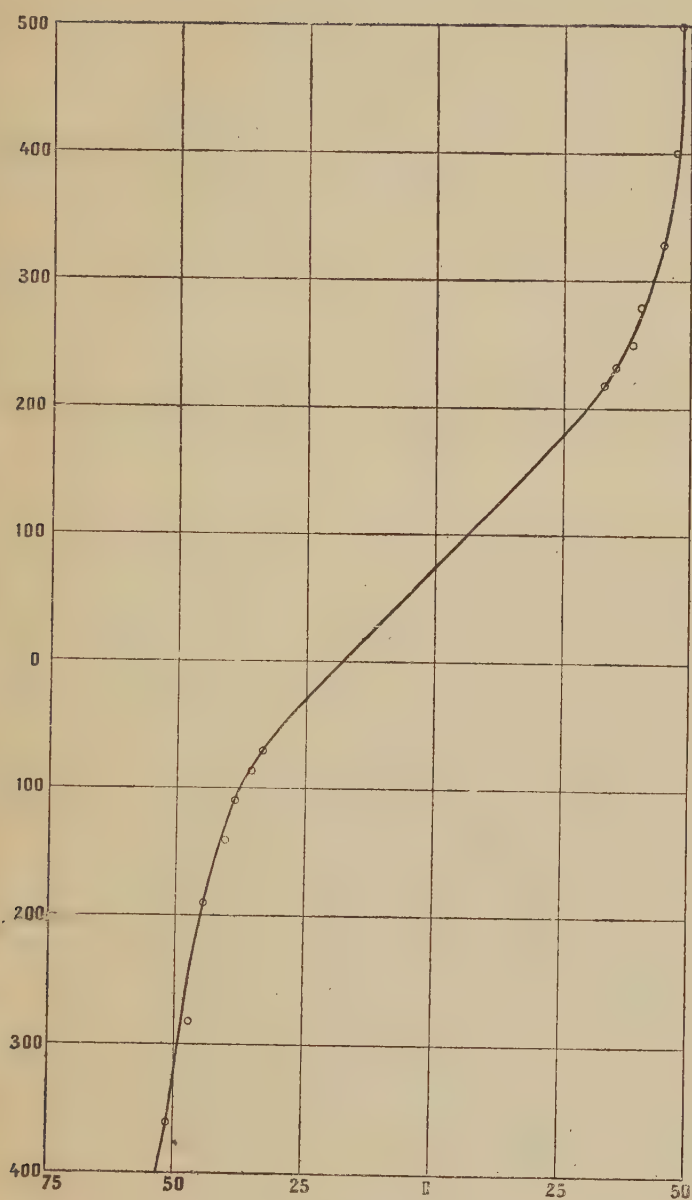


Fig. 26.

$$\frac{I-i}{I} = \frac{2}{m}.$$

| I.      | <i>i.</i> | $\frac{k}{D}$ .      | Correction. |
|---------|-----------|----------------------|-------------|
| 0,00572 | 0,00473   | 1,09.10 <sup>4</sup> | 0,04        |
| »       | 0,00445   | 1,09.10 <sup>4</sup> | 0,05        |

$$\frac{i}{I} = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} - \frac{2}{m}.$$

| I.      | <i>i.</i> | <i>m.</i> | $\frac{k}{D}$ .      |
|---------|-----------|-----------|----------------------|
| 0,00572 | 0,00473   | 11,5      | 1,04.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00445   | 8,9       | 1,02.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00425   | 7,7       | 1,00.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00400   | 7,0       | 1,00.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00385   | 6,0       | 1,00.10 <sup>4</sup> |
| »       | 0,00355   | 5,1       | 0,90.10 <sup>4</sup> |

87. Dans toutes les courbes expérimentales, c'est à coup sûr la partie rectiligne, voisine de l'origine qui donne la moindre précision. J'ai dit, en effet, qu'il existait une différence de potentiel de contact entre les plateaux du condensateur, bien qu'ils aient été coupés dans la même planche d'aluminium. J'ai poussé les mesures aussi près que possible de l'origine, mais j'ai dû interpoler pour ainsi dire la partie rectiligne en raccordant par une droite les branches positive et négative des courbes de saturation. Les mesures étaient très difficiles à exécuter; en effet, si l'on se reporte à la courbe d'étalonnage du compensateur, il est facile de voir que, pour les positions de la matière active proches de la chambre d'ionisation, de faibles variations de la distance amènent de fortes variations de courant, tandis que c'est le contraire qui a lieu quand la matière active est très éloignée. En conséquence, il est assez difficile d'obtenir la position exacte correspondant à la compensation.

88. Dans le cas où les ions sont supposés avoir même

valence [formule (14)], j'ai donné les valeurs de  $\frac{k}{D}$  auxquelles m'ont conduit mes expériences; ces valeurs décroissent bien, comme le veut la théorie, à mesure que les courants deviennent de plus en plus faibles. Dans un grand nombre de cas les nombres trouvés sont très voisins des nombres théoriques; en tout cas, ils ont été toujours de l'ordre auquel on doit s'attendre si les ions avaient même valence.

En effet, la présence d'ions à charge double devait fatalement amener une élévation du rapport  $\frac{k}{D}$  calculé à partir des résultats expérimentaux; il serait donc supérieur à  $1,23.10^4$ . Or à aucun moment je n'ai constaté de ces écarts dans mes mesures.

89. Si l'on considère maintenant les valeurs calculées à partir du *manque de saturation*, au voisinage de la saturation, on remarque que, pour les courants les plus élevés, les résultats sont très satisfaisants dans la plupart des cas; ils atteignent fréquemment la valeur théorique de  $\frac{k}{D}$ . Néanmoins, avec les courants qui s'éloignent de plus en plus de la saturation, on trouve des rapports qui vont en diminuant, sans cesser d'être toujours de l'ordre de grandeur de  $\frac{k}{D}$  relatif à des ions de même valence. Il est manifeste qu'avec des courants de plus en plus faibles, les causes d'erreurs dues aux fuites électriques prennent une importance plus grande. C'est vraisemblablement à des fuites de ce genre que sont dues les diminutions du rapport  $\frac{k}{D}$  calculé en prenant sur la courbe les courants les plus faibles.

90. Mais la présence d'ions à charge double aurait toujours tendu à élever la valeur du rapport  $\frac{k}{D}$ , à le rendre supérieur à  $1,2.10^4$ , et cela d'autant plus que le nombre

de ces ions eût été plus grand. Il est d'ailleurs difficile de se rendre compte de la proportion à laquelle on doit s'attendre : car tandis que Franck et Westphal dans leurs recherches sur les rayons de Röntgen n'en constatent que de 9 à 10 pour 100, la proposition devait être beaucoup plus considérable dans les expériences de Townsend, puisque toujours avec les rayons de Röntgen, Townsend trouva pour l'ion positif une charge double de celle de l'ion négatif.

Dans mes expériences où l'ionisation était produite par les rayons  $\gamma$  émis par un sel de radium pur, et par un petit nombre de rayons  $\beta$  très pénétrants, il ne me semble guère possible qu'il y ait eu des ions de valences différentes, d'après les valeurs trouvées pour  $\frac{k}{D}$ . C'est d'ailleurs ce qu'avaient trouvé Franck et Westphal pour l'ionisation produite par le même agent. Étant donnée la ressemblance entre les rayons  $\gamma$  et les rayons de Röntgen, les deux résultats de Franck et Westphal (1) nous semblent singuliers.

Quant à Millikan, dans aucun des deux cas il n'en a constaté.

#### CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

91. Dans la première partie de ce Mémoire, j'ai rappelé les résultats de divers expérimentateurs concernant la diffusion des ions dans les gaz. J'ai repris moi-même ces expériences et, dans ce but, j'ai imaginé des dispositifs nouveaux; en particulier, j'ai réalisé un appareil me permettant d'opérer à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. J'ai de plus cherché à atteindre une plus grande précision dans les mesures.

Ma première préoccupation a été de chercher si la nature de la paroi exerçait une action sur le phénomène de la diffusion des ions. Les mesures que j'ai exécutées

---

(1) *Ber. der. Deut. Phys. Ges.*, 1909, p. 149 et p. 276.

sur trois métaux, acier, maillechort, laiton, m'ont confirmé les résultats que j'avais obtenus avec un appareil plus simple et pour des tubes d'étain et d'acier, à savoir qu'aux erreurs d'expériences près, la nature de la paroi est sans influence sur la valeur du coefficient de diffusion.

J'ai mesuré les coefficients de diffusion des ions, à la pression atmosphérique, dans l'air, le gaz carbonique, l'oxygène et l'azote, et j'ai signalé un fait curieux au sujet de l'hydrogène.

J'ai également mesuré le coefficient de diffusion des ions dans l'air et l'azote à des pressions supérieures à la pression atmosphérique.

Dans une seconde partie, j'ai étudié la mesure directe du rapport  $\frac{k}{D}$  de la mobilité au coefficient de diffusion, et j'ai mis en œuvre une méthode imaginée par M. Langevin pour déterminer ce rapport en partant des courbes de saturation. Les résultats que j'en ai tirés m'ont conduit à conclure que, lorsque l'ionisation est produite par les rayons  $\gamma$ , il n'y a pas d'ions porteurs de charges multiples.

Dans mes recherches, j'aurais été sans cesse arrêté par des difficultés matérielles si M<sup>me</sup> Curie n'avait mis à ma disposition les ressources de son Laboratoire; je tiens à lui exprimer mes respectueux remerciements.

*Vu et approuvé :*

Paris, le 30 mai 1913.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

*Vu et permis d'imprimer :*

Paris, le 30 mai 1913.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

---

---

## TABLE DES MATIÈRES.

---

|                   | Pages. |
|-------------------|--------|
| GÉNÉRALITÉS ..... | 1      |

### PREMIÈRE PARTIE.

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| CHAPITRE I. — <i>Recherches diverses sur la diffusion des ions...</i> | 7  |
| Mesure du coefficient de diffusion des ions, par Townsend. ....       | 7  |
| Recherches de Franck et Westphal.....                                 | 15 |
| Recherches diverses .....                                             | 18 |
| Applications à la Météorologie.....                                   | 20 |
| CHAPITRE II. — <i>Travaux personnels sur la diffusion des ions..</i>  | 22 |
| Résultats .....                                                       | 47 |
| Conclusions.....                                                      | 50 |

### DEUXIÈME PARTIE.

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CHAPITRE I. — <i>Détermination de <math>\frac{k}{D}</math>, par Townsend.....</i>        | 54  |
| Travaux de Haselfoot.....                                                                | 64  |
| Recherches de Millikan.....                                                              | 65  |
| CHAPITRE II. — <i>Méthode de Langevin pour la mesure de <math>\frac{k}{D}</math>....</i> | 70  |
| Recherches expérimentales .....                                                          | 78  |
| CONCLUSIONS GÉNÉRALES .....                                                              | 100 |

---

---

## SECONDE THÈSE.

---

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

---

Application de la mesure de la tension superficielle à la détermination du poids moléculaire des liquides.

*Vu et approuvé :*

Paris, le 30 mai 1913.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

*Vu et permis d'imprimer :*

Paris, le 30 mai 1913.

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.



---

52391 PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS.  
Quai des Grands-Augustins, 55.

---

